



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – UFRJ
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA – CCMN
INSTITUTO DE FÍSICA
CURSO: LICENCIATURA EM FÍSICA

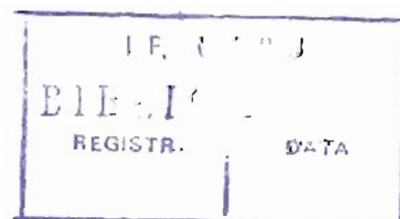
CONTEXTUALIZAÇÃO DO ENSINO DO SOM AO NÍVEL MÉDIO: A
PSICOACÚSTICA E A POLUIÇÃO SONORA

ALUNO: Marcelo Leitão Queiroz
DRE: 092121216

PROFESSORES: Susana de Souza Barros (orientadora)
Wilma M. Soares (suplente)
João José F. de Sousa
Artur Chaves

RIO DE JANEIRO, JUNHO, 2004

01/2004



Dedico este trabalho a todos aqueles que me acompanharam no longo percurso da minha graduação, com amor, ânimo e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores que formam a banca deste trabalho, principalmente a minha orientadora e amiga, Susana de Souza Barros, pelo empenho na busca partilhada para, da melhor forma, expressar dúvidas e chegar a conclusões.

A meus pais, pelo carinho e apoio de sempre; a minha irmã, Débora Leitão Queiroz, pelas intermináveis noites diante do computador; a minha esposa, Luzia Queiroz, pelas noites de sono sozinha; a meu primo, Daniel Queiroz, pela ajuda na revisão do trabalho e a meus amigos, por serem apenas meus amigos.

"O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário."
Albert Einstein

SUMÁRIO

CONTEXTUALIZAÇÃO DO ENSINO DO SOM AO NÍVEL MÉDIO: A PSICOACÚSTICA E A POLUIÇÃO SONORA

INTRODUÇÃO	8
PARTE I – BREVE HISTÓRICO DA ACÚSTICA	11
PARTE II – NOÇÕES SOBRE FÍSICA ONDULATÓRIA	15
Pulso	15
Conceito de onda mecânica.....	16
Tipo e natureza das ondas	17
Frequência, intensidade e forma de onda	18
Comprimento de onda	20
Velocidade de propagação da onda em cordas	21
Fenômenos característicos das ondas	22
Reflexão	22
Difração	23
Refração	23
Interferência de ondas	23
Ondas estacionárias	24
Frequência fundamental	25
Harmônicos superiores e inferiores	25
PARTE III – VIBRAÇÕES MECÂNICAS AUDÍVEIS: SOM	27
Som	27
Velocidade de propagação do som no ar	27
Tom “puro”	28
Intensidade sonora.....	28
Níveis sonoros	29
Propagação do som	29
Propagação do som ao ar livre	30

Fontes esféricas	30
Fontes cilíndricas	31
Pistão vibrante	31
Propriedades das ondas sonoras	32
Reflexão de ondas sonoras	32
Eco	32
Reverberação	33
Refração de ondas sonoras	33
Difração de ondas sonoras	34
Interferência de ondas sonoras	34
Efeito Doppler	35
Ondas de choque e estrondo sônico	36
Ressonância	38
Famoso exemplo de ressonância: A Ponte de Tacoma	39
PARTE IV – O APARELHO AUDITIVO: ANATOMIA E AUDIÇÃO	42
O ouvido externo	43
O ouvido médio	43
O ouvido interno	44
Fisiologia da audição	45
Deficiência da audição	46
PARTE V – PSICOACÚSTICA	47
Sensibilidade do ouvido	47
Variação da sensibilidade com a idade	48
Infra-som e ultra-som	48
Distorção não-linear dos ouvidos	49
Deslocamento do limiar auditivo: Mascaramento	49
Fadiga auditiva	50
Audição binaural	51
O efeito da intensidade na localização do som	52
O efeito de fase na localização do som	52
O efeito de tempo da localização do som	53

PARTE VI – ALGUMAS CURIOSIDADES ACÚSTICAS	54
PARTE VII – RUÍDO E SEUS EFEITOS SOBRE A AUDIÇÃO	57
Definição	57
Fontes de ruído e métodos de combate	58
Repercussão sobre a saúde	58
Perda de audição induzida por ruído	59
Zumbido induzido pelo ruído	61
Programas de conservação da audição	61
Normas e leis brasileiras sobre ruído	61
Resolução CONAMA nº 001, de 08/03/1990	62
CONCLUSÃO	65
ANEXO 1 – TABELA DE NÍVEIS DE RUÍDOS COMUNS	66
ANEXO 2 – TABELA COM NORMA ABNT – NB – 10152/87	67
ANEXO 3 – TABELA CONTENDO PORTARIA FEDERAL Nº 3214/78	68
ANEXO 4 – EXPERIÊNCIAS DIDÁTICAS	69
Experimento I – Ressonância com taças de cristal	69
Experimento II – Efeito Doppler: fonte sonora girando na extremidade de um barbante	70
Experimento III – Visualizando frequências audíveis	71
Experimento IV – Audição binaural	73
Experimento V – O ar como massa vibrante: o ressoador de Helmholtz	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

INTRODUÇÃO

Identificar e correlacionar o conhecimento científico, a produção e o uso da tecnologia e as condições de vida do mundo moderno, assim como julgar os riscos e benefícios da produção tecnológica, fazem parte do objetivo principal do ensino de Física.

Assim como é necessário apresentar a Física Clássica ao ensino médio, é também importante ensinar a “Física do dia-a-dia”, das transmissões de televisão, do funcionamento da telefonia celular à energia nuclear. Desta forma, o aprendizado de física deve estimular os jovens a acompanhar e pesquisar notícias científicas, fornecendo-lhes meios para a interpretação de seus significados. Levar o aluno a compreender a importância de uma missão espacial, a descoberta de uma nova técnica de diagnóstico médico que utiliza princípios eletromagnéticos são apenas alguns exemplos de informações presentes no cotidiano que deveriam ser veiculados em sala de aula.

Talvez o mais importante desafio que o professor de física enfrenta é o de transportar para a sala de aula fenômenos reais que possam fazer com que os alunos relacionem a observação do fenômeno com os conceitos teóricos que lhe são ensinados.

Sob esse aspecto, o ensino de Física tem o papel de formação conceitual e conseqüente desenvolvimento de uma visão crítica, que permita ao aluno melhor compreender tanto os fenômenos naturais como o enorme volume de informações provenientes dos diversos meios de comunicação modernos. E o instrumento imprescindível para a condução desta formação é o professor.

De acordo com as novas diretrizes dos Parâmetros Curriculares Nacionais (1), a física aplicada ao ensino médio tem por dever contribuir para a formação de uma cultura científica plena, desmistificada, que permita ao aluno compreender sua própria interação com a natureza e com a cidadania. Porém, ainda nos deparamos com a prática tradicional de ensino, repleta de conceitos e fórmulas matemáticas que, por estar distante do mundo vivido pelos alunos, torna-se vazia de significado concreto.

Este trabalho tem por finalidade apresentar o estudo de um assunto que muitas vezes não é abordado na escola, embora que, quando simplesmente comentado de forma superficial, desenvolve de forma significativa a curiosidade dos alunos, principalmente no que diz respeito à análise experimental dos conceitos.

A acústica, como parte da Física, é definida como o estudo das vibrações e de ondas mecânicas nos meios materiais (2). Seu estudo surgiu há aproximadamente quatro mil anos, a partir da observação do comportamento de instrumentos musicais rudimentares. Assim este trabalho inicia-se com um resumo histórico, relacionando o estudo do som com a criação da música.

Não seria possível iniciar o estudo do som propriamente dito sem apresentar ao aluno os conceitos básicos de movimentos oscilatórios. Nesse contexto, o presente trabalho inicia o estudo introdutório de *pulsos*. A observação do movimento leva a definição de *período*, *frequência* e conseqüentemente *ciclo*. É demonstrado o significado de *onda* e suas principais características, como *natureza*, *comprimento*, *forma*, *velocidade de propagação* e *superposição de ondas*.

A acústica vem provar a interação entre o estudo do som com a Mecânica Newtoniana. Como ponto de partida, o advento da música estimulou cientistas a observarem as diferentes peculiaridades das *fontes sonoras* bem como suas qualidades, ou seja, *intensidade*, *volume*, *altura* e *timbre*. Posteriormente, *velocidade do som* e *níveis sonoros*, serão abordados de forma mais detalhada, pois estão diretamente relacionada à percepção auditiva.

Por se tratar de uma onda mecânica que se propaga em meios materiais, o som está sujeito a fenômenos facilmente perceptíveis, como *refração*, *reflexão* e *interferência*. Outros fenômenos de natureza ondulatória aqui abordados são o *Efeito Doppler* e a *ressonância*.

Porém, todo estudo de natureza física tem por origem a percepção e conseqüente observação de fenômenos naturais. No caso deste trabalho, o ato de ouvir constitui o marco inicial da observação dos fatos. Por isso, o aprofundamento nos conceitos da *acústica subjetiva* (ou psicológica) é de extrema importância. Como e por que ouvimos? Qual o caminho percorrido pelo som desde sua origem até a total compreensão da informação pelo cérebro? Para chegarmos a tais respostas, faz-se necessário a demonstração prática de alguns desses fenômenos de forma razoavelmente simples e objetiva.

No mundo moderno todos sofrem os efeitos desagradáveis do *barulho* proveniente de uma série de ruídos artificiais e naturais. O barulho contínuo vem sendo objeto de estudo há décadas, sendo o que tem origem nos choques e impactos considerados muito mais complexos e seus efeitos sobre o ser humano muito severos. A dificuldade de

equacionamento do problema e de se estabelecer normas de controle sobre o ruído, a falta de fiscalização pelas autoridades competentes e o total esquecimento de uma educação cívica na escola de base, resultam na extrema complexidade da matéria, que se apresenta sob os mais variados aspectos.

Neste trabalho, é relatado na parte I, um resumido histórico do surgimento e posterior crescimento do interesse no estudo dos fenômenos acústicos.

Na parte II, é apresentado de forma sucinta as noções básicas sobre a física ondulatória, para que o estudante familiarize-se com as leis básicas da Física e com alguns termos técnicos geralmente empregados em qualquer estudo sobre acústica.

O estudo mais aprofundado do som e suas principais características, é relatado na parte III deste trabalho.

Na parte IV, a anatomia do ouvido e todo o processo fisiológico da audição é apresentado de forma bem simplória, pois um aprofundamento neste tópico fugiria do escopo principal do trabalho, que é desenvolvido na parte V. Esta relata de forma detalhada como o ouvido humano é um aparelho extremamente delicado e preciso.

Algumas curiosidades vivenciadas no dia-a-dia são detalhadas na parte VI, de forma rápida e bem objetiva, com o intuito de despertar nos alunos mais interesse pelo assunto.

A parte VII finaliza este estudo informando os problemas causados pelo excesso de ruído em ambientes e as conseqüências que o ser humano sofre pela falta de controle sobre o mesmo.

PARTE I – BREVE HISTÓRICO DA ACÚSTICA

Historicamente, o estudo do som relacionava-se diretamente com a música, arte exercida pelos hindus, egípcios e chineses desde 4.000 a.C. Nessa época, os equipamentos musicais (ainda não poderiam ser chamados de instrumentos) eram bem diferentes daqueles que nos chegariam por intermédio dos gregos, especialmente no que diz respeito à divisão da escala musical (3).

Pitágoras (569-500 a.C.), foi o principal responsável pelos primeiros estudos sistematizados de Acústica Científica (4), tendo em vista, a análise dos sons musicais, cerca de 2.500 anos atrás. A ele devemos a idéia do que significa um intervalo de oitava e suas subdivisões, assim como o estudo da escala harmônica.

Em suas observações, Pitágoras descobriu que a frequência de um som era inversamente proporcional ao comprimento de uma corda. Para chegar a tal conclusão, Pitágoras utilizou um instrumento musical muito elementar, conhecido como monocórdio (figura 1), que consistia de uma corda tensionada e fixa em suas extremidades. Um terceiro apoio móvel possibilitava que a corda tivesse outros pontos fixos além dos extremos. Estas divisões da corda em diferentes porções correspondiam às notas de uma escala. Dependendo da posição do apoio móvel, ao tanger a corda, a vibração produzia diferentes comprimentos de onda.

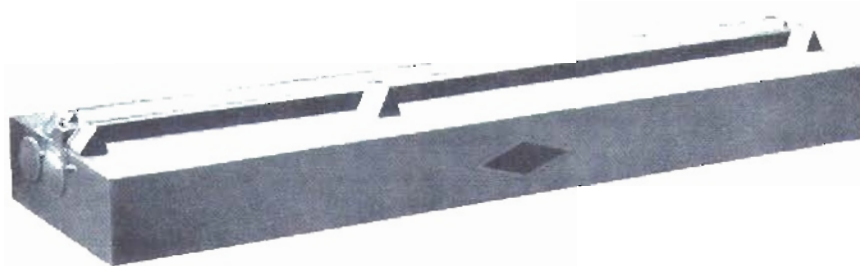


Figura 1 – Monocórdio de Pitágoras (4).

As descobertas de Pitágoras foram o marco para o surgimento de especulações filosóficas e matemáticas, que fizeram com que o som fosse estudado ao longo dos séculos como algo místico, um tipo de mistura entre aritmética e música.

Em meados do século XVII, uma nova era de investigações científicas começa a surgir [Galileu Galilei (1564-1642)]. Os experimentos com som passam a ser estudados sem estar relacionados com música. Galileu descobre o fenômeno da ressonância (5), verificando que uma corda pode vibrar pela excitação provocada por uma outra corda próxima que tenha as mesmas características físicas. Descobre ainda que cada pêndulo tem seu próprio período de oscilação, antecipando com isso a idéia de *frequências naturais*.

No ano de 1600 Galileu estudou e deduziu as leis aplicadas às cordas vibrantes. Mostrou experimentalmente que era necessário aumentar a tensão aplicada em uma corda para que pudesse ser percebida uma variação em sua frequência, admitindo, ainda, que o material de que era composta a corda influenciava diretamente nos resultados. Porém esses resultados não foram publicados. Mersenne (1558-1648), independentemente, descobriu as mesmas leis, que assim foram-lhe atribuídas, sendo hoje chamadas de *Leis de Mersenne sobre cordas vibrantes*. Mersenne teria ainda feito as primeiras tentativas de medir a velocidade do som no ar. Para isso, utilizava como relógio as batidas do próprio coração, para medir a diferença de tempo entre a detonação de um revólver e a chegada do som produzido pela explosão (5).

Pierre Gassendi (1592-1655), filósofo e matemático francês, utilizando um disparo de canhão e um outro de espingarda, provou que a velocidade do som independe da frequência do mesmo, contrariando a afirmação de Aristóteles, de que um som agudo se propagaria com maior velocidade que um som grave (6).

Os experimentos que determinaram o valor da velocidade do som no ar juntamente com os que mostram que as velocidades de som em sólidos, líquidos e gases eram diferentes, surgiram no século XVIII. Isaac Newton (1642-1727), em 1687, mediu a velocidade do som no ar, tendo então obtido um valor igual a 280 m/s (6).

Lagrange, cerca de 70 anos mais tarde, provou que Newton não considerara em seus cálculos a variação de temperatura, mostrando, para isto, que a velocidade do som no ar não poderia ser medida por um processo simplesmente isotérmico(6).

Cerca de 100 anos após, estudando os argumentos de Lagrange, o matemático francês Laplace (1749-1827) modificou as fórmulas de Newton, conseguindo assim

obter o valor de igual a 320 m/s para a velocidade do som no ar, muito parecida com a que conhecemos hoje.

Em 1812, o matemático francês Joseph Fourier (1768-1830), sem interesse específico pelos estudos relacionados a som, desenvolveu um teorema para o estudo do calor, o qual leva seu nome e que, mais tarde, seria também utilizado nos estudos do som. George Simon Ohm (1789-1854), (físico e matemático alemão, estudioso dos efeitos da condução elétrica) foi o primeiro a aplicar o Teorema de Fourier nos problemas de acústica, formulando a *Lei de Ohm para o som*. Essa lei enuncia que *“todas as qualidades tonais são resultado de combinações de um maior número de tons, com frequências mensuráveis, e ainda que os complexos tonais poderiam ser analisados dentro de uma soma de tons simples, separadamente, pelo ouvido.”*

Entretanto, foi somente com o físico e anatomista alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894) que a acústica começou a ser estudada como ciência. No seu livro clássico *Sensations of Tones* (1863), Helmholtz desenvolve a teoria da soma e diferença de tons e a teoria dos ressonadores, incluindo a experiência com o ressonador que leva o seu nome, conhecido até hoje como Ressonador de Helmholtz (6), que consiste numa cavidade com paredes rígidas, conectada ao exterior por uma abertura, chamada pórtilo ou duto (figura 2).

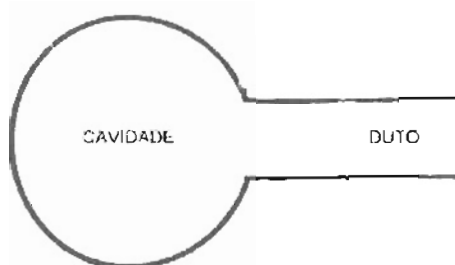


Figura 2 -- Ressonador de Helmholtz (3).

No final do século XIX estudiosos ligados à eletricidade e à eletrônica começam a desenvolver interesse pelo estudo da acústica, tornando esta época, um marco para o progresso da mesma. E a força propulsora do progresso, lamentavelmente, foi a necessidade imediata de se desenvolverem sistemas de comunicação mais eficientes, modernos e seguros, devido à eclosão da Primeira Guerra Mundial.

Como praticamente não existiam estudiosos exclusivos da área de acústica, engenheiros elétricos passaram a utilizar cálculos matemáticos a fim de construir os primeiros transdutores¹. Em 1876, Alexander Graham Bell (1847-1922), filho de um instrutor de surdos-mudos e professor de fisiologia vocal na Universidade de Boston, utilizou seus estudos em corrente elétrica e descobriu que a densidade do ar variava quando era atravessada por uma corrente elétrica. Com isso, criou o microfone magnético, sendo considerado assim, o inventor do telefone.

Em 1877, Thomas Alva Edison (1847-1931), desenvolveu o fonógrafo, dando assim origem aos sistemas de gravação e reprodução do som, sendo a empresa Radio Corporation of America (RCA) a primeira a utilizar a reprodução elétrica.

Em 1921, como por mágica, surge o cinema sonoro, sendo os sons dos filmes executados a partir de discos. Porém todo o esplendor dos filmes confrontava-se com o grave problema da falta de sincronismo entre as imagens e os sons a elas relacionados (3). Era comum que as falas gravadas antecipssem ou fossem reproduzidas posteriormente à cena exibida, criando situações muitas vezes cômicas nas salas de projeção. Este problema somente teria fim no ano de 1927, com o lançamento do primeiro filme com som sincronizado, iniciando uma nova era para aquela que viria, popularmente, a ser conhecida como a sétima arte.

No final da Segunda Guerra Mundial, o uso do ultra-som (ondas sonoras com frequências superiores a 20.000 Hz) para a detecção de objetos submarinos foi aperfeiçoado pelos alemães, que começaram a calcular a profundidade e distância dos objetos submersos (3). Este mesmo ultra-som é agora empregado na medicina diagnóstica. Surgem ainda, as diversas especialidades da acústica, como a acústica fisiológica, a psicoacústica, a acústica médica e a acústica arquitetônica, esta última voltada para o estudo do controle do barulho nas habitações urbanas e no habitat humano.

¹ Transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro. No caso de nosso estudo, os transdutores convertem energia elétrica em energia acústica, ou vice-versa.

PARTE II - NOÇÕES SOBRE FÍSICA ONDULATÓRIA

Qualquer movimento realizado por um período de tempo, recebe o nome de *movimento oscilatório*. Dentro deste contexto, encontramos na natureza diversos fenômenos de origem oscilatória, como por exemplo ondas do mar, ondas sonoras, ondas luminosas e de raios X . Existem, basicamente, três tipos de ondas: *ondas mecânicas* (ondas do mar e o próprio som), *ondas eletromagnéticas* (casos da luz, ondas de rádio, etc) e *ondas de matéria*, estas estudadas num ramo da Física chamado Física Quântica. Neste trabalho, abordaremos o primeiro tipo de ondas: as *ondas mecânicas*.

Pulso

Imagine uma mola ou corda presa em uma de suas extremidades e sendo movimentada a partir da outra ponta. Podemos observar que o pulso é um distúrbio que se propaga com determinada velocidade ao longo da corda, sem que esta sofra deslocamento na direção de propagação da onda. Isso se deve a cada partícula da corda permanecer em repouso até ser alcançada pela onda, movimentando-se por um curto período de tempo e voltando ao repouso logo em seguida.

Resumidamente, um pulso consiste em uma propagação de perturbação do meio sem que haja transporte de matéria (7), mas sim de energia.

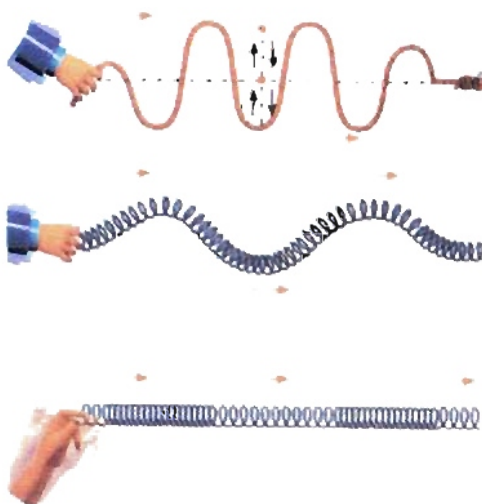


Figura 3 – Exemplos de pulsos em cordas e molas (7).

Conceito de onda mecânica

Toda oscilação ou vibração mecânica se propagará somente onde houver um meio elástico qualquer (3). Neste caso, provocará uma perturbação na pressão estática do meio elástico. À essa perturbação, dá-se o nome de onda ou onda de pressão. Passada a perturbação, a pressão estática do meio volta ao normal. O princípio básico do conceito de onda é que esta se forma a partir de uma série de pulsos, distúrbios que se propagam através do meio, sem que haja transporte de matéria.

Para exemplificar melhor este princípio, tomaremos o funcionamento de um alto-falante. Quando o cone de um alto-falante move-se para frente, cada partícula de ar que está adiante dele é “empurrada”. Este movimento é transmitido de partícula para partícula, na direção do “empurrão”, criando-se uma região de compressão. Ao atingir seu ponto de máxima excursão para frente, o cone pára e começa a se mover para trás. Então, aquelas primeiras partículas antes “empurradas” são agora “puxadas” na direção do cone. Deslocamentos esses que são transmitidos de partícula para partícula, até que as primeiras partículas “puxadas” começam a voltar para suas posições de origem, seguidas pelas demais partículas. A elasticidade do ar também ajuda a trazer de volta para suas posições originais as partículas “empurradas”, criando-se uma região de rarefação. E todo o processo prossegue numa sucessão de “empurrões” seguidos de “puxões” (8), os quais propagam-se como compressões e rarefações no ar, formando uma onda sonora.

Outro exemplo de fácil visualização são as ondas observadas quando jogamos uma pedra em um lago de águas calmas com folhas boiando no espelho de água. Porém, importante se faz esclarecer que, no caso do lago, as folhas não caminham com as ondas, mas apenas se movem para cima e para baixo em torno de suas posições originais, caracterizando um processo de vibração (8).

Tipo e natureza das ondas

As ondas apresentam uma série de classificações e características, com base em suas propriedades físicas. Seguindo o escopo deste trabalho, caracterizaremos as ondas quanto ao sentido de movimento que as partículas do meio se movimentam durante a propagação da mesma. Neste sentido, as ondas podem ser *transversais* ou *longitudinais*.

Uma onda é *transversal* quando na propagação de um pulso em uma corda (ou mola), cada partícula vibra perpendicularmente à direção de propagação (7) (figura 4).

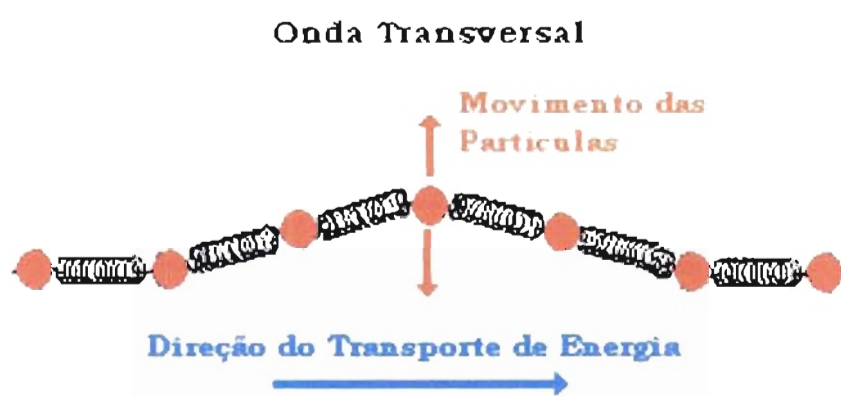


Figura 4 - Onda transversal em mola *slinky* (9)

Uma onda é *longitudinal* quando a vibração dos elementos do meio ocorre paralelamente ao sentido de propagação da onda (7).

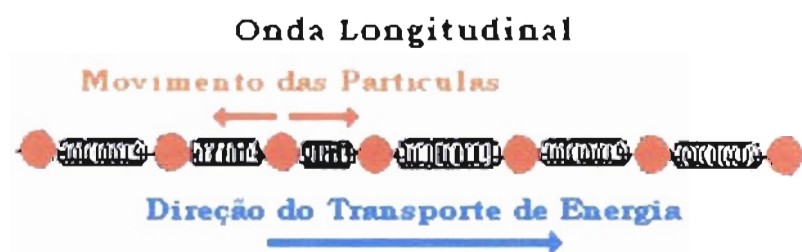


Figura 5 - Onda longitudinal em mola *slinky* (9).

A onda sonora é um exemplo clássico de onda longitudinal. Enquanto uma onda sonora move-se das bordas de um alto-falante para o ouvido de um indivíduo, as

partículas de ar vibram para frente e para trás no mesmo sentido e no sentido oposto do transporte de energia, conforme exemplificada na figura 6.

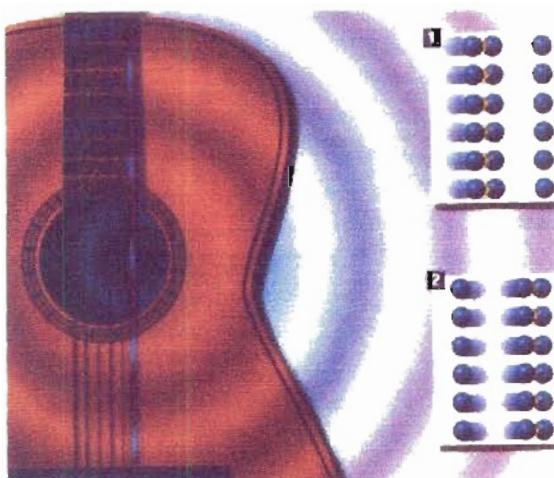


Figura 6 – Exemplo de onda longitudinal – onda sonora produzida por um violão. As partículas de ar movem-se no sentido do transporte de energia (10).

Frequência, intensidade e forma de onda

Considerando a representação de onda sonora mostrada na figura 7, pode-se observar que no ponto *A* não existe perturbação na pressão atmosférica. Mas a partir desse ponto a compressão começa a aumentar, atingindo o seu valor máximo no ponto *B*, quando então começa a cair, até que no ponto *C* já não há mais compressão. Neste ponto a pressão atmosférica volta a ser normal. Desse ponto em diante a rarefação começa a aumentar, atingindo seu máximo no ponto *D*, a partir do qual começa a reduzir voltando a ficar normal no ponto *E*.

Resumidamente, podemos dizer que do ponto *A* até o ponto *E* houve uma vibração completa. Essas vibrações completas, que se repetem diversas vezes, são chamadas de ciclos. E frequência é definida como a quantidade de ciclos que ocorre em um segundo, e sua unidade é o Hertz (Hz). Assim, frequência de 20 Hz é aquela que completa 20 ciclos em um segundo. E frequência de 20.000 Hz (ou 20 KHz) é aquela que completa 20.000 ciclos em um segundo.

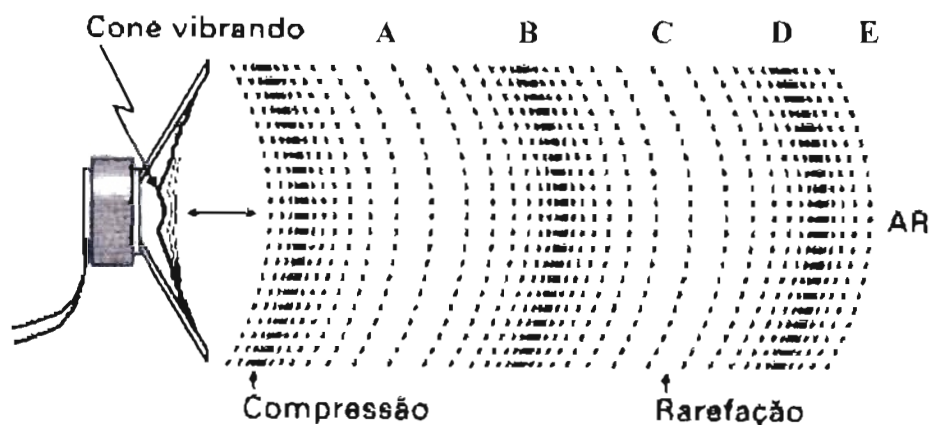


Figura 7 – Exemplo de produção de onda sonora, destacando locais de máxima compressão e máxima rarefação (8).

A figura 8 mostra a representação gráfica de duas ondas de mesma frequência, mas de amplitudes diferentes. Quanto maior for a amplitude, mais elevada será sua intensidade.

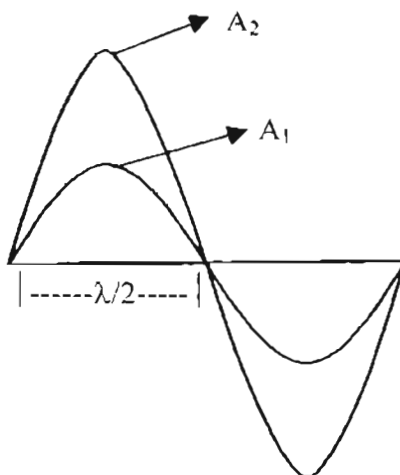


Figura 8 – Ondas de mesma frequência e amplitudes diferentes (8)

Na figura 9 vemos a representação gráfica de ondas produzidas por três notas musicais iguais emitidas por três instrumentos musicais diferentes. Uma produzida por um diapasão, outra por um violino e a última por um oboé. Podemos observar que todas

têm a mesma frequência e a mesma intensidade. Porém é fácil notar a diferença no formato da onda destas.

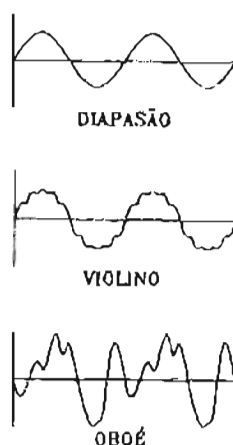


Figura 9 – Ondas de mesma frequência e mesma intensidade, mas formas diferentes (8).

Comprimento de onda

A figura 10 demonstra o comprimento físico que uma onda senoidal transversal desenvolve um ciclo completo. A distância λ é denominada *comprimento de onda*. Este pode ser calculado para qualquer frequência. Basta dividir a velocidade do som no ar (344 m/s aproximadamente) pelo valor da frequência. Por exemplo, para 100 Hz, temos

$$\lambda = \frac{344}{100} = 3,44 \text{ metros} \quad (\text{Eq. 1})$$

Já o intervalo de tempo de uma oscilação completa de uma onda denomina-se *período*.

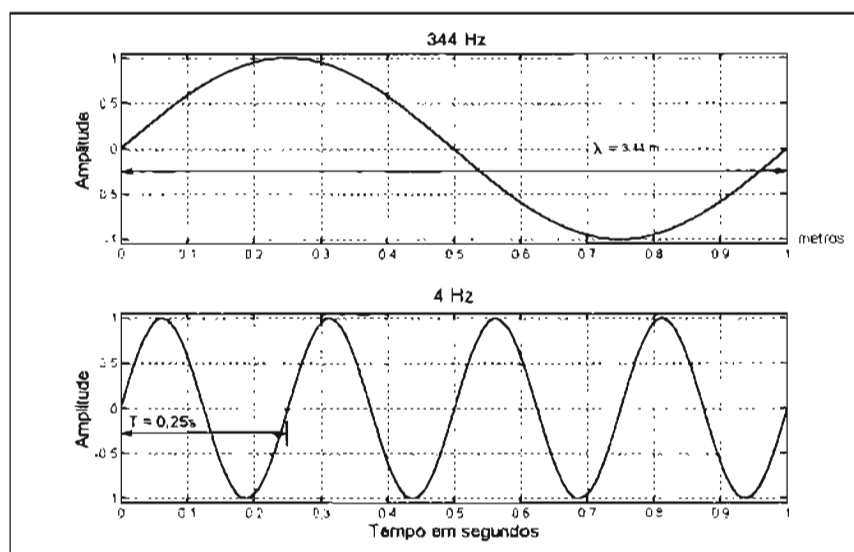


Figura 10 – Infográfico representando comprimento de onda de frequência 344 Hz e onda de 4 Hz em gráfico de amplitude x tempo (11).

Velocidade de propagação da onda em cordas

Tomamos duas cordas com mesma massa e comprimento, porém uma mais tensionada do que a outra. Ao aplicarmos um pulso, observamos que a onda se propaga mais rapidamente na corda mais tensionada.

Já se tivermos duas cordas de mesmo comprimento, mas com massas diferentes, ao aplicarmos o pulso, podemos observar que este propaga-se mais rápido naquela corda de menor massa e de menor *densidade linear*, representada por $\mu = m / L$, onde m significa a massa e L significa o comprimento da corda.

Para cordas de mesma massa e submetidas à mesma força de tração, porém com comprimentos diferentes, a velocidade de propagação do pulso será maior naquela corda de maior comprimento.

Resumidamente, podemos concluir que a velocidade de propagação de ondas numa corda depende da força F de tensão a que está submetida e da relação massa m e comprimento L .

Ao atingir determinado ponto de uma corda, a onda faz com que esse ponto vibre determinado número de vezes por unidade de tempo, caracterizando uma vibração com

freqüência f . O intervalo de tempo de uma vibração completa denomina-se período T da onda.

Independentemente da freqüência da vibração aplicada a uma corda tensionada, a velocidade de propagação da onda é constante. Podemos então descrever a equação fundamental:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow \lambda = vT \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow v = \lambda f \quad (\text{Eq.2})$$

Fenômenos característicos das ondas

As ondas possuem características bem peculiares, abordadas nos tópicos a seguir:

Reflexão

As ondas podem ser *refletidas* quando encontram em seu percurso no meio elástico superfícies grandes comparadas ao seu comprimento de onda (12). Nessas circunstâncias as leis de reflexão usadas para luz em óptica geométrica podem ser utilizadas para ondas (3). A Lei da Reflexão estabelece que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência (figura 11).

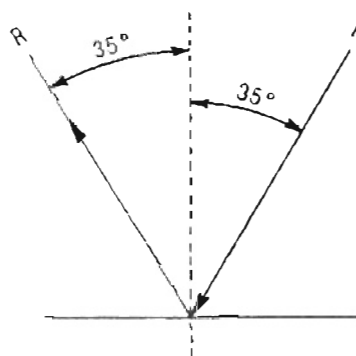


Figura 11 – Reflexão total (12)

Os pontos imóveis, chamados de *nós* (N), são formados devido à interferência destrutiva. Já os pontos que têm amplitude máxima, chamados de *ventres* (V), são formados devido à interferência construtiva.

Ao longo da corda, os nós e os ventres tendem a manter a mesma posição ao longo da corda. Com isso, os nós ficando imóveis impedem que a energia mecânica os atravesse, resultando numa *onda estacionária*.

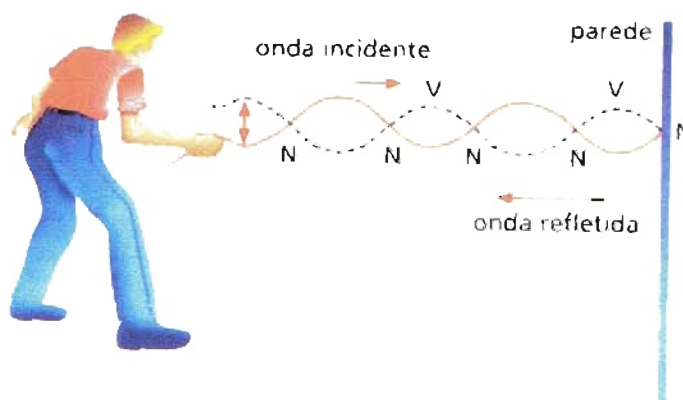


Figura 16 – Formação de ondas estacionárias em uma corda (7).

Frequência fundamental

Como regra geral, toda onda pode ser decomposta em uma série de senóides simples, cujas frequências guardam uma relação de números inteiros com a frequência mais baixa da série, por esse motivo chamada de *frequência fundamental* (f_0) (3).

Harmônicos superiores e inferiores

As frequências superiores e inferiores, que formam múltiplos inteiros da fundamental e com valores iguais a $1f_0$, $2f_0$, $3f_0$, ... nf_0 , constituem os sobretons de f_0 e são conhecidas como tons harmônicos ou *frequências harmônicas* do movimento vibratório. As frequências harmônicas são, geralmente, registradas como f_1 , f_2 , f_3 , f_4 , ... , f_n .

Como o valor da primeira harmônica coincide com o valor da fundamental, costuma-se considerar a fundamental como sendo a primeira harmônica ($f_0 \cong f_1$).

Tomamos por exemplo uma vibração com frequência de 500 Hz. A oscilação de 1.000 Hz constituirá a segunda harmônica e a de 1.500 Hz, a terceira harmônica etc...

De acordo com o conteúdo harmônico, as vibrações terão diferentes formas de ondas, que representarão a soma algébrica da amplitude das suas componentes. A figura 17 mostra, as formas de onda resultantes da somatória de duas frequências que guardam entre si um intervalo de oitava² (f_0 e f_2).

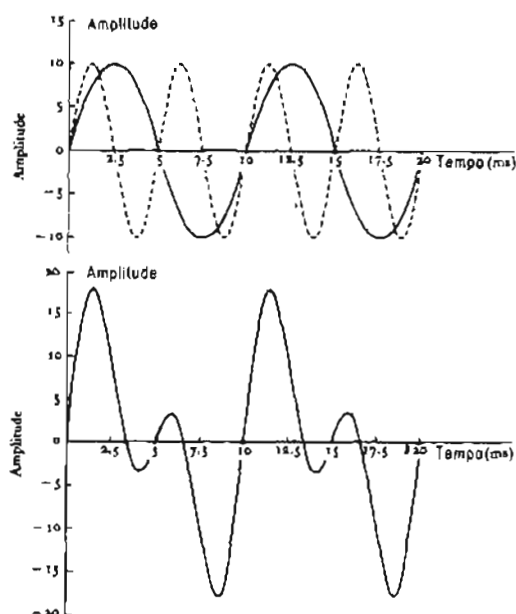


Figura 17 – Somatório das formas de ondas (8).

² Uma oitava equivale ao dobro ou metade da frequência em questão. Ex.: 1.000 Hz – uma oitava acima vale 2.000 Hz e uma oitava abaixo vale 500 Hz.

PARTE III – VIBRAÇÕES MECÂNICAS AUDÍVEIS : SOM

Vibrações mecânicas são originadas pela deformação de uma região de um meio elástico e que, para se propagarem, necessitam de um meio material. Daí decorre que as ondas mecânicas não se propagam no vácuo.

Quando transmitidas ao nosso sentido da audição, são por ele captadas como uma impressão fisiológica denominada *som*.

Som

Dá-se o nome de *som* a toda vibração mecânica que se propaga num meio elástico. Se as frequências que o compõem encontrarem-se dentro da faixa de 20 Hz à 20 KHz, afirma-se que este som está dentro de uma faixa de audiodfrequências perceptíveis ao ouvido humano.

Dependendo do conteúdo harmônico, cada som terá uma determinada forma de onda (8).

Velocidade de propagação do som no ar

A velocidade de propagação do som depende da elasticidade e da densidade do meio (2). A zero graus Celcius e pressão atmosférica normal, a velocidade do som³ vale 331.4 m/s. A dependência da velocidade de propagação do som com a temperatura ambiente no ar é expressa através da equação (14):

$$V_{\text{som}} = 331,4 + 0,6 T \quad (\text{Eq.3})$$

onde V_{som} é a velocidade de propagação do som e T a temperatura em grau Celsius.

³ Normalmente ouvimos dizer que a velocidade do som vale 344 m/s, pois, na maioria da vezes, considera-se a temperatura ambiente padrão a 22° C.

Exemplo da velocidade do som em outros meios: no hidrogênio, a velocidade é da ordem de 1.261 m/s ; na água 1.435 m/s ; no aço 5.100 m/s e na borracha 100 m/s.

Tom “puro”

Chamamos de *tom* toda oscilação audível resultante de uma única frequência (8). O tom corresponde à oscilação harmônica cuja forma de onda é representada por uma senóide. Na natureza não se encontram os chamados tons puros.

Os diapasões são instrumentos de metal que geram tons puros, capazes de vibrar em frequências singelas e determinadas de acordo com suas características estruturais. A faixa de frequências mais freqüentemente usada pelos diapasões estende-se de 125 Hz a 4.096 Hz.

Tanto o som como o tom são fenômenos considerados como puramente psicológicos, ou seja, produtos de um fenômeno físico – vibração mecânica ou uma oscilação mecânica, que produzem a sensação de ouvir.

Intensidade sonora

O som transporta energia mecânica. A quantidade de energia transportada por unidade de tempo por unidade de área é definida como *intensidade sonora* e medida no Sistema Internacional (SI) em Watt por metro quadrado (W/m^2).

Ondas sonoras provenientes de fontes pontuais⁴, que não encontram obstrução expandem-se de forma esférica (condição de campo livre). Nessa condição, a intensidade **I** pode ser expressa por :

$$I = \frac{W}{4\pi d^2} \quad (\text{Eq.4})$$

onde W é a potência sonora e d a distância da fonte ao ponto (2).

⁴ São consideradas fontes pontuais aquelas cujas dimensões são muito menores que o comprimento de onda gerado.

Níveis sonoros

Sabemos que existe uma diferença significativa entre a intensidade do ruído de um apito de locomotiva e o som do balançar das folhas de uma árvore sob ação do vento. Por isso, existe a necessidade de uma escala que determine as diversas intensidades ou pressões sonoras com que usualmente lidamos (2).

Assim, o nível de intensidade sonora (N_1) é expresso por (2):

$$N_1 = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (\text{Eq.5})$$

onde I é a intensidade sonora e I_0 a intensidade de referência⁵, (10^{-12} W / m^2). A unidade do nível de intensidade é o decibel (dB), que significa a décima parte do *bel*.

Por analogia aos estudos em telefonia, deu-se o nome de *bel* ao resultado do logaritmo da relação entre determinada intensidade e a intensidade de referência.

O Anexo 1 mostra os níveis em decibel de algumas fontes familiares. A audição humana situa-se entre os limites de 0 a 120 dB. Acima disto podem ocorrer danos irreversíveis ao aparelho auditivo.

Como o decibel é uma grandeza logarítmica, não podemos combinar valores através da álgebra normal. Assim o nível sonoro total de dois violinos, cada um tocando com 60 dB não é 120 dB, mas sim 63 dB, como mostra a equação 6.

$$L_t = 10 \cdot \log [10^{(L_1/10)} + 10^{(L_2/10)}] \quad (\text{Eq.6})$$

Onde, L_t significa o nível total em dB, L_1 significa o nível em dB do primeiro sinal e L_2 o nível em dB do segundo sinal.

Propagação do som

Na propagação do som, como no caso de qualquer vibração, as partículas do meio elástico comportam-se como pequenas massas conectadas com molas, executando cada

⁵ A intensidade de referência corresponde ao limiar de audição na frequência de 1 KHz.

uma onda um movimento harmônico simples (MHS), que corresponde a variação da pressão sonora. Este movimento varia em função da frequência e da respectiva amplitude (8).

As ondas de pressão propagam-se através de sucessivas compressões e rarefações das partículas do meio. A compressão acontece quando a partícula empurra a que lhe segue imediatamente, e a rarefação é causada pelo espaço vazio deixado pelas partículas que se afastaram daquela região. As compressões e rarefações referem-se às pressões máximas e mínimas da propagação sonora, respectivamente.

Propagação do som ao ar livre

A propagação do som ao ar livre, em geral, não ocorre de maneira uniforme (8). Depende diretamente do formato das fontes das quais se originam, como veremos nos exemplos a seguir.

Fontes esféricas

A propagação sonora apresenta simetria esférica com a fonte localizada no centro. As frentes de ondas são sonoras esféricas e concêntricas, com mesma intensidade em todas as direções.

A fonte comporta-se como uma esfera pulsante, cujo diâmetro irá variar de acordo com a frequência aplicada (6).

Como característica principal, as ondas irradiadas por essa esfera formam frentes de ondas (de formato também esféricas), cujas amplitudes de pressão são proporcionais à distância ao centro da esfera. Supondo, como exemplo, numa esfera de raio r , a pressão sonora a uma distância $2r$ vale metade da pressão originada, apresentando um decréscimo de 6dB no nível de pressão sonora.

Para melhor visualizar o conceito, a figura 18 mostra como exemplo um avião voando, cujo som é propagado em ondas esféricas.

⁶ O MHS corresponde a um movimento de oscilação com período e amplitude constantes.

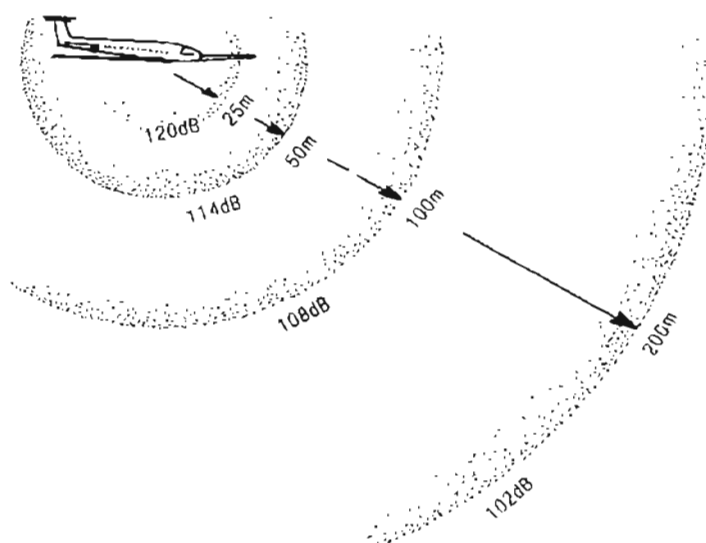


Figura 18 – Ondas sonoras esféricas (8).

Fontes cilíndricas

A propagação das ondas sonoras têm formato de um cilindro. Entretanto, as características diferem daquela de uma fonte esférica, apresentando redução ou acréscimo de 3dB no nível de intensidade sonora (conforme definição a seguir).

Como exemplo prático, observa-se tal fenômeno num trem em movimento.

Pistão vibrante

Neste caso, a irradiação efetua-se na direção de um eixo.

O pistão vibrante é caracterizado pela diretividade do feixe sonoro que este reproduz. Tal característica acentua-se bastante na emissão de altas frequências.

Dois exemplos bem comuns de pistões vibrantes são os alto-falantes e a própria boca.

Propriedades das ondas sonoras

Quando uma onda sonora é transmitida através de um meio, e neste meio existirem obstáculos, comportamentos particulares podem surgir.

Reflexão de ondas sonoras

Da mesma maneira como acontece com os pulsos em uma corda, citado no capítulo II, o choque das ondas sonoras com algum obstáculo resulta numa mudança no sentido de propagação do som, a chamada *reflexão*.

A reflexão do som pode originar dois fenômenos : eco e reverberação.

Eco

Foi observado na experiência descrita para determinar a velocidade do som, o retorno do som produzido pela reflexão das ondas sonoras em um obstáculo.

Para que o *eco* ocorra, é necessário que o intervalo de tempo entre o som emitido e o som retornado seja da ordem de 0,1 segundo.

Considerando a velocidade do som como 340 m/s, observamos que a onda sonora percorre uma distância duas vezes maior do que aquela compreendida entre o ponto de emissão e o anteparo. Logo, temos:

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \Rightarrow 340 = \frac{2\Delta S}{0,1} \Rightarrow \Delta S = 17 \text{ metros} \quad (\text{Eq.7})$$

Assim, para que ocorra o fenômeno do eco é necessário que o som seja emitido a uma distância mínima de 17 metros do obstáculo.

Reverberação

A *reverberação* ocorre freqüentemente em ambientes amplos e com superfícies lisas e paralelas entre si, quando um determinado som permanece no ambiente após haver cessado sua emissão pela fonte.

Isto acontece quando o som originado e o refletido chegam ao ouvido num intervalo pouco menor que 0.1 segundo (15). Assim, quando a distância entre o ouvinte e a superfície refletora for menor que 17 metros, ou seja, menor que a distância exigida para que ocorra o eco, a reflexão dará origem à reverberação. É o que ouvimos em longos corredores ou saguões de prédios, por exemplo.

Refração de ondas sonoras

A *refração* de ondas sonoras provoca uma mudança na direção de propagação e na sua velocidade, devido à mudança do meio de propagação. Sabemos que, se num mesmo meio de propagação de ondas a temperatura variar, ocorre também a refração.

Para exemplificar esse fenômeno, podemos observar quando ondas sonoras viajam por cima da água do mar e o ouvinte está posicionado afastado da beira da água. A temperatura da água diminui a temperatura do ar que está logo acima do plano desta, ocasionando uma lentidão na propagação das ondas sonoras. Isso resulta numa refração das ondas para baixo, como visto na figura 19.

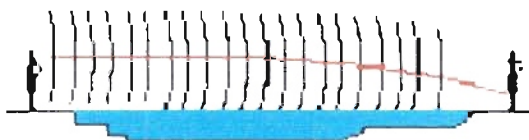


Figura 19 – Refração de ondas na superfície da água (13).

Suponhamos agora que o ar esteja sujeito a um vento forte. É fato conhecido que, se o som se propaga no sentido e na direção do vento, os efeitos se somam. A velocidade final será a resultante da soma dos valores da velocidade do som mais a do vento.

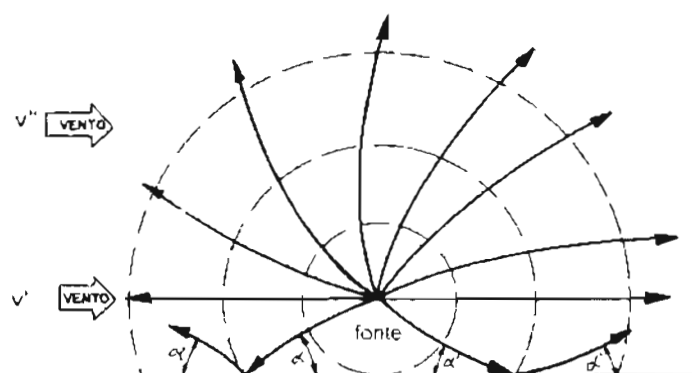


Figura 20 - Efeito do vento sobre a velocidade do som (2).

Se, pelo contrário, o som se propaga na mesma direção, mas no sentido inverso ao do vento, a resultante será a diferença dos valores de suas velocidades.

Difração de ondas sonoras

Difração é a capacidade que o som tem de contornar obstáculos que encontra em seu caminho de propagação (7). Normalmente podemos ouvir o que se passa no quarto vizinho mesmo estando com a porta do nosso fechada, pois o som atravessa os contornos e fendas dos obstáculos. É por essa razão que vizinhos barulhentos podem incomodar bastante.

Interferência de ondas sonoras

Como já vimos no estudo de pulsos em cordas, a superposição de ondas pode resultar em sons mais ou menos intensos. No primeiro caso, temos uma interferência construtiva, pois o som é intensificado. Já no segundo caso, temos uma interferência destrutiva, que resulta num som atenuado.

Façamos a experiência: ao ouvirmos uma determinada música em uma sala fechada, concentraremos nossos ouvidos no som mais grave da bateria ou do

contrabaixo, por exemplo. Feito isso, começaremos a caminhar dentro da sala aleatoriamente e poderemos observar que, em determinados pontos da sala, o som destes instrumentos ora se intensificarão, ora se atenuarão. Tal fato decorrerá do efeito das interferências construtivas e destrutivas no ambiente.

Efeito Doppler

Em geral, o *efeito Doppler* pode ocorrer sempre que existir um fenômeno ondulatório (7). É um fenômeno observado quando a fonte emissora das ondas está em movimento em relação ao observador.

Estamos bem familiarizados com este fenômeno devido a nossa experiência (mesmo sendo intuitiva) com ondas sonoras. Tomemos como exemplo um carro de polícia ou uma ambulância em movimento, estando nós imóveis nesse referencial (figura 21). Conforme este carro se aproxima de nós, o som gerado pela sirene torna-se cada vez mais alto, ou melhor dizendo mais agudo. Logo ao começar a se afastar, a sirene emite gradativamente um som mais baixo, ou mais grave. Este fato explica o efeito Doppler como uma mudança da frequência da onda sonora produzida por uma fonte em movimento.

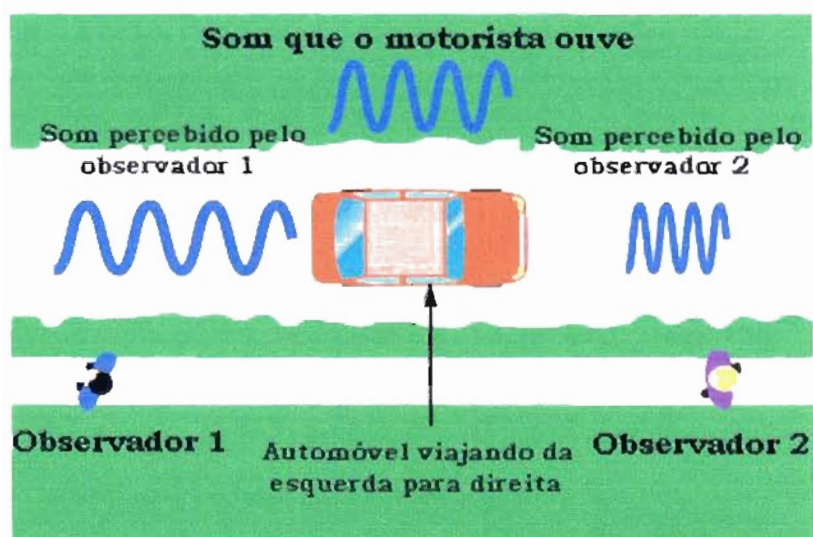


Figura 21 - Infográfico exemplificando o Efeito Doppler (13).

Ondas de choque e estrondo sônico

Compreendido o fenômeno do efeito Doppler, podemos dizer que este acontece sempre quando a velocidade da fonte for menor do que a velocidade das ondas sonoras que estas geram. Porém existe a possibilidade da fonte sonora deslocar-se mais rapidamente do que as ondas sonoras. É o caso dos aviões supersônicos, por exemplo.

Como já estudamos, o som viaja através de ondas através de um meio de propagação, que no nosso estudo é o ar. Sabemos também que estas ondas, na verdade, são ondas de pressão.

Tomaremos o avião como uma fonte emissora de som. Quando este desloca-se na atmosfera, comprime o ar ao seu redor, principalmente à sua frente. Dessa forma, cria ondas de pressão.

Quando este avião voa a uma velocidade inferior à do som, as ondas de pressão geradas pelo som de seu(s) propulsor(es), viajam mais rapidamente, espalhando-se por todos os lados, inclusive à frente do avião. Concluindo, o som ainda vai na frente.

Porém, se o avião tiver a capacidade de acelerar para uma velocidade igual a do som, o chamado Mach⁷ 1 ($v = 1.224 \text{ Km/h}$), este irá comprimir o ar à sua frente e acompanhar as ondas de pressão do próprio som, gerado pelo propulsor, com a mesma velocidade de propagação deste. O resultado é um acúmulo de ondas na parte da frente do avião. Se o avião persistir exatamente com essa velocidade por algum tempo, à sua frente se formará uma verdadeira “muralha”, desde que as ondas sejam mantidas na mesma posição em relação ao avião (ver figuras 22 e 23). Esse fenômeno é conhecido como *barreira sônica* (popularmente conhecido como barreira do som).

Se o avião continua a acelerar, este deixará para trás essa barreira de ondas de pressão, mas em geral, somente atingirá velocidades supersônicas se ultrapassar de forma rápida a velocidade de Mach 1, para evitar justamente a formação da barreira sônica.

Quando o ar começa a ser comprimido em fluxo supersônico, sua pressão e densidade aumentam, formando uma onda de choque. Em vôo supersônico, o avião produz inúmeras dessas ondas de choque, que são mais intensas no “nariz” do avião, nas partes dianteira e posterior das asas e na parte final da fuselagem (10).

⁷ Esta unidade tem o nome do físico austríaco que mediu, pela primeira vez, a velocidade de propagação do som no ar.

Essas ondas de choque geradas pelo avião atingirão o solo depois da passagem deste, que está mais veloz. Uma pessoa no referencial do solo, irá ver o avião cruzar o céu sem ouvir ruído algum, até que as ondas de choque alcancem tal pessoa, que ouvirá um forte estampido, o chamado estrondo sônico. Tal estrondo pode, em certas circunstâncias, carregar energia suficiente para ocasionar danos materiais no solo, como quebra de vidraças e rachaduras em paredes.

Na velocidade do som



Maior que a velocidade do som



Figuras 22 e 23 –Momentos antes e após a ruptura da barreira do som (15).



Figura 24 – Fotografia de caça supersônico quebrando a barreira do som (15).

Ressonância

Relembrando o estudo de Termologia, as moléculas dos corpos somente se mantêm sem movimento algum, quando, teoricamente, estão inseridas em um ambiente com temperatura de zero absoluto. Como tal fato não se encontra na Natureza, todos os corpos vibram e possuem certa frequência, chamada de *frequência natural* ou *própria*.

Quando uma onda, de determinada frequência, incide sobre um corpo cuja frequência natural coincide com a frequência de tal onda, ocorre o fenômeno da *ressonância* (8).

Diversos objetos ou sistemas, como copos, janelas e até pontes, podem ser quebrados ao serem atingidos por sons de frequência igual à sua frequência natural. Ao se fornecer de forma periódica energia a determinado sistema, um agente externo, que no nosso caso pode ser uma fonte sonora, pode fazer com que todo o sistema vibre

aumentando de forma gradual sua amplitude. Sendo suficientemente grandes e coincidentes com a frequência natural do sistema, essas amplitudes causam o chamado *colapso do sistema* (16).

Um exemplo simples de ressonância, é o brinquedo do balanço. O balanço possui uma frequência natural de oscilação, que se obtém empurrando-o em determinada direção e sentido. Os empurrões, se dados de forma correta por um agente externo, ou mesmo pela própria pessoa nele sentado, com o balançar das pernas, passam a funcionar como fonte de movimento de oscilador forçado, o qual ao coincidir com a frequência natural do balanço, entram em ressonância com este, provocando oscilações com amplitudes cada vez maiores.

Outro exemplo simples podemos encontrar nas caixas de ressonância, que foram inventadas para reforçar os sons produzidos por instrumentos musicais. Estas caixas ampliam determinadas vibrações, quando estas entram em ressonância com a frequência da vibração do volume de ar contido no interior destas. O violão e o violino, são exemplos bem conhecidos de caixas de ressonância.

Famoso exemplo de ressonância: A Ponte de Tacoma

No estado de Washington, EUA, no dia 7 de novembro de 1940, por volta das onze horas da manhã, a ponte suspensa⁸ sobre o estreito de Tacoma, apenas 4 meses depois de ter sido aberta ao tráfego, foi destruída durante um pequeno vendaval. A ponte possuía 1530 metros de comprimento total, sendo 850 metros a medida de seu vão central (16).

Inicialmente, sob a ação do vento, o vão central da Ponte de Tacoma pôs-se a vibrar primeiramente no sentido vertical, passando posteriormente a vibrar de forma torcional, com as torções ocorrendo no sentido oposto nas duas metades do vão. Uma hora depois, o vão central entrava em colapso, destruindo-se totalmente (17).

⁸ Como o próprio nome diz, nas pontes suspensas a pista é suspensa por cabos de aço, e estes fixados no alto de elevadas torres.

Diversas foram as tentativas de explicação, chegando-se a conclusão que tal acontecimento não foi devido simplesmente à força imposta pelo vento, que, na manhã do desastre, soprava com velocidade de aproximadamente 68 Km/h, sendo insuficiente, por si só, para destruir uma ponte solidamente construída. O desastre realmente ocorreu devido ao fenômeno físico da *ressonância*, sendo impossível resistir às oscilações que atingiram amplitudes surpreendentes. A seguir, seguem fotografias reais das fases de construção e do desastre da Ponte de Tacoma.



Fig.26 - Início da construção em 1938 (17)

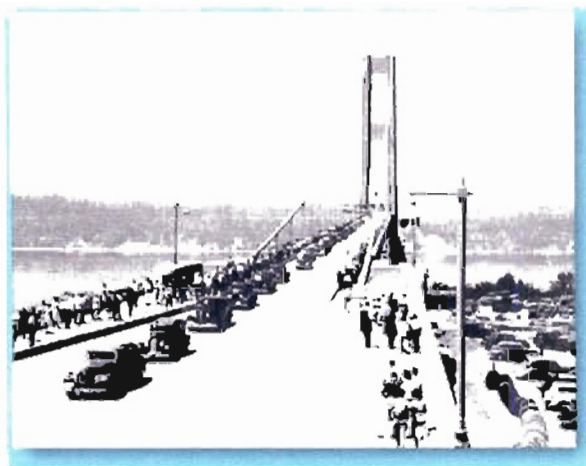


Fig.27 - Abertura da ponte, em 1º de julho de 1940 (17).



Fig. 28 - Vibração torcional sob ação do vento (17).



Fig. 29 – Colapso do vão central (17).



Fig. 30 -- Estrutura de aço rompida (17).

PARTE IV – O APARELHO AUDITIVO : ANATOMIA E AUDIÇÃO

Embora o estudo da anatomia do ouvido seja objeto de outras ciências, é de extrema importância ter o conhecimento básico de como esse complexo sistema sensorial capta e processa as ondas sonoras.

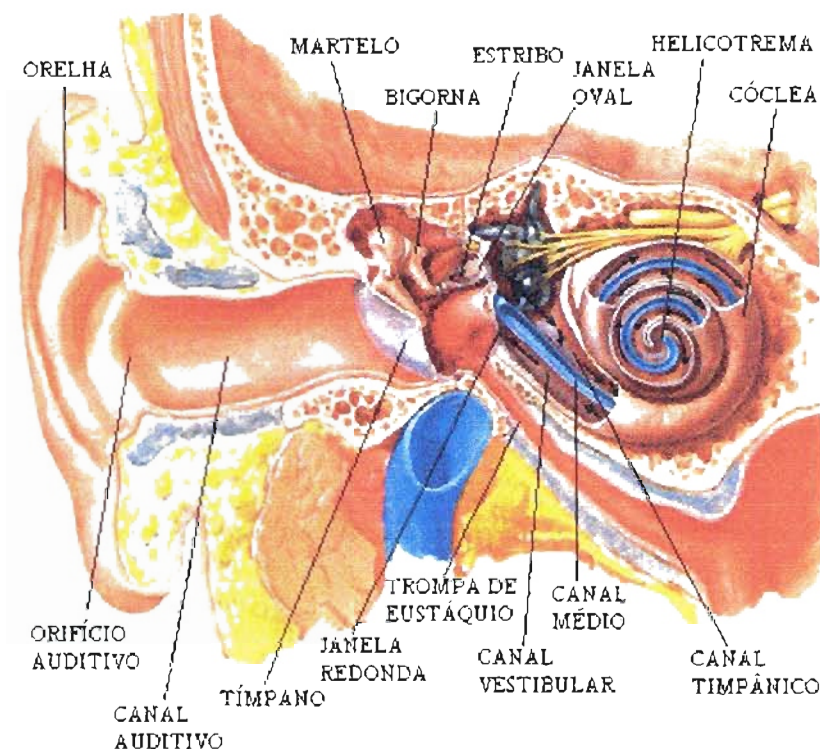


Figura 31 – Ilustração esquemática do ouvido (18).

Do ponto de vista histórico, a audição tem fundamental importância para as civilizações humanas. Escutar é a chave da linguagem (15). Aprendemos a falar ao ouvirmos as pessoas falarem. Neste trabalho, o enfoque principal será o estudo de como este aparelho coordena a audição. Não será abordado a função de controle de equilíbrio, pois foge do objetivo desse estudo.

Segundo os especialistas, o ouvido é uma das estruturas mecânicas mais intrincadas e delicadas do corpo humano (18). O mesmo é dividido em três partes, ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno.

O ouvido externo

O *ouvido externo* consiste no conjunto formado pela orelha e o canal auditivo externo, canal este que termina no tímpano. As paredes do canal auditivo são formadas por ossos e cartilagens, sendo que a parte óssea mede cerca de 16 mm e a cartilagem 8 mm. Em média, o canal tem 25 mm de comprimento, 7 mm de diâmetro e cerca de 1 cm^3 de volume total. O tímpano é oblíquo, tendo a forma aproximada de um cone com base ovalada. O seu diâmetro maior é da ordem de 10 mm e o menor de 9 mm, possuindo a membrana uma espessura de 0,05 mm e superfície de 85 mm^2 em média. A superfície do tímpano é côncava e o ponto de máxima concavidade, denominado umbus, coincide com a posição inferior do braço do martelo. Cabe ressaltar que o tímpano assemelha-se mais a um cone rígido e raso que a uma membrana esticada, que é a idéia mais comum que se tem do mesmo (3).

O ouvido médio

Logo depois do tímpano existe uma cavidade cheia de ar, conhecida como cavidade do tímpano, cujo volume é da ordem de $1,5 \text{ cm}^3$ e que contém os três ossículos: o martelo, a bigorna e o estribo. A função de tais ossículos é acoplar mecanicamente o tímpano à cóclea. A cavidade do tímpano comunica-se com a cavidade nasal por meio da Trompa de Eustáquio e tal comunicação tem por finalidade manter a mesma pressão em ambas as faces. Os ossículos têm aproximadamente 23, 27 e 25 mg de massa, respectivamente, sendo os menores ossos do corpo humano (19). A figura 32 dá uma visão clara do tamanho dos mesmos.



Figura 32 – Da esquerda para direita: estribo, bigorna e martelo (10).

Na parede interna da cavidade do tímpano existem as janelas oval e redonda, que são aberturas do caracol. A janela redonda é fechada por uma membrana e a oval é fechada pelo “pé” do estribo junto com alguns ligamentos especiais. O estribo possui movimentos, com o propósito de proteção do mecanismo do ouvido. O martelo é fixado na bigorna por meio de ligamentos cartilagosos rígidos e o braço é embebido no topo do tímpano. A porta inferior da bigorna é fixada semi-rigidamente na cabeça do estribo e como resultado de tais ligações o conjunto forma um sistema capaz de vibrar às baixas frequências.

O ouvido interno

O *ouvido interno* é também conhecido como *labirinto* e se compõe por vestíbulo, caracol e canais semi-circulares. Estes canais não serão abordados pois não interferem diretamente na audição. Tais canais estão ligados ao campo gravitacional e a sua finalidade é nos dar o sentido de equilíbrio. A cóclea (caracol) tem o aspecto de um caramujo comum de jardim (18) e mede cerca de 5 mm do ápice à base e a parte mais larga têm cerca de 9 mm. A cóclea consiste num canal duplo enrolado por 2 e $\frac{3}{4}$ voltas em torno de um eixo ósseo, convenientemente entalhado para servir de sustentação aos nervos que saem da mesma. A cóclea (ver figura 33) em corte transversal aparece dividida em três canais (ou rampas): canal timpânico, canal vestibular e canal coclear (ou médio).

Por toda a cóclea se estendem os verdadeiros receptores auditivos, as *células ciliadas* (ver figura 34).

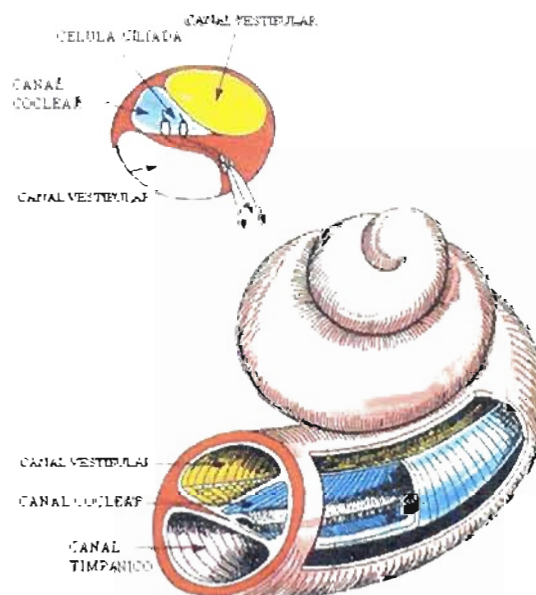


Figura 33 – Esquemática da Cóclea (18).

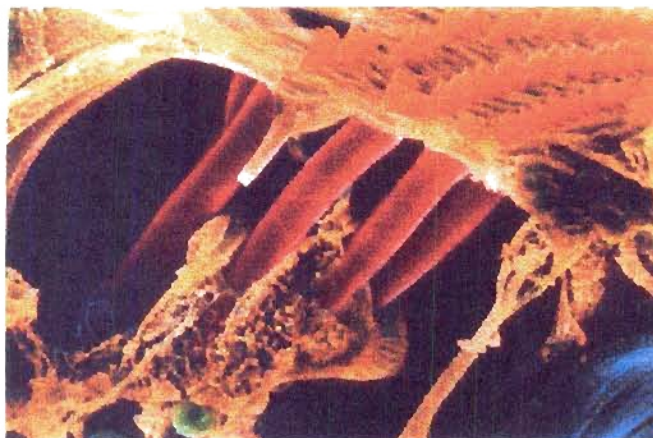


Figura 34 -- Células ciliadas (10).

A forma das células ciliadas internas e externas são diferentes. As internas têm forma de gota e duas fileiras lineares de cílios, enquanto as externas são cilíndricas e têm três fileiras de cílios. No ser humano, existem 3.400 células ciliadas internas e 12.000 externas, em cada cóclea.

Fisiologia da audição

Como já vimos, o som é a sensação produzida quando as vibrações do meio externo tocam a membrana timpânica.

A maior sensibilidade dos ouvidos varia de 1 KHz até 3 KHz, aproximadamente.

As ondas sonoras entrando pelo canal externo produzem vibrações na membrana timpânica. Os ossículos do ouvido médio, por sua vez, transmitem essas vibrações para a janela oval. Cada onda sonora estabelece uma onda que aumenta de amplitude como se movesse em direção ao ápice do duto coclear. Sons de alta frequência causam máxima vibração na base do duto coclear; sons de baixa frequência causam vibrações máximas próximas ao ápice. Os movimentos dessas ondas sonoras resultam na inclinação dos pêlos das células ciliadas. Estas induzem a uma modificação no potencial elétrico dessas células e liberam um neurotransmissor que estabelece impulsos nervosos nas fibras do nervo vestibolo-coclear (3).

As ondas sonoras encontram resistência quando passam do ar para o meio aquoso da orelha interna. Entretanto, devido às vibrações coletadas pela membrana timpânica

serem transferidas para uma janela oval muito pequena, as vibrações são amplificadas, e esse sistema de amplificação realiza o casamento de impedância⁹ entre o ar e o meio aquoso do ouvido interno. Se as ondas sonoras entrassem diretamente pela cóclea para a janela oval, a sensibilidade auditiva poderia ser reduzida em torno de 30 dB, ou nove vezes menor.

A transmissão do som através do ouvido médio se deve a contração dos músculos do tímpano. A contração desses músculos, os que se inserem no estribo, endurece e resiste ao movimento da cadeia dos ossículos do ouvido médio. A contração do tensor do tímpano aumenta a tensão sobre a membrana timpânica, puxando-a para dentro.

Essas ações diminuem a transmissão de sons de baixa frequência. A contração reflexa dos músculos do ouvido médio protege o ouvido interno de danos por sons altos (3).

Deficiência da audição

Qualquer porção do aparelho auditivo pode ser afetada por doença ou lesão, provocando surdez parcial ou total. A deficiência na condução auditiva é causada por interferência na transmissão das vibrações sonoras através do ouvido externo ou médio. As vibrações podem estar diminuídas ou bloqueadas pelo acúmulo excessivo de cerúmen no ouvido externo, por perfuração ou endurecimento da membrana timpânica, ou por adesão dos ossos do ouvido médio. Na *otosclerose*, a ossificação na base do estribo bloqueia a transmissão do som para a janela oval. Longa exposição a sons altos produz deficiência da audição. Neste tipo de deficiência, a perda da audição é geralmente maior para frequências altas (18).

⁹ A impedância é a propriedade que os corpos têm de se oporem ao movimento.

PARTE V – PSICOACÚSTICA

A Psicoacústica pode ser definida como o estudo fisiológico da audição (3), ou seja, é a ciência que procura interpretar como o sistema auditivo responde aos estímulos sonoros.

A determinação das habilidades e limitações da audição humana têm extrema importância na ajuda de como avaliar e usar as informações sonoras no meio ambiente em que estamos inseridos, não esquecendo de levar sempre em consideração peculiaridades e diferenças individuais.

Diversas técnicas relativamente simples, que podem ser utilizadas em laboratórios, ou mesmo em salas de aula, possibilitam uma compreensão mais objetiva da Psicoacústica. Alguns experimentos possibilitam “enxergar” utilizando o som, isto é distinguir quanto à localização (3) e o tipo de objeto. No decorrer deste trabalho serão apresentados alguns deles.

Sensibilidade do ouvido

À medida que os instrumentos eletrônicos foram se desenvolvendo, por haver possibilidade de maior controle dos sinais acústicos, também foram sendo removidas algumas das dificuldades e deficiências no desenvolvimento da Psicoacústica, especialmente nos cálculos do limiar da sensibilidade do ouvido (8).

Com os resultados dos estudos, estabeleceu-se que a região de maior sensibilidade do ouvido situa-se entre 1KHz e 5 KHz , dentro da faixa de frequências audíveis, que abrange, normalmente, de 16 Hz a 20 KHz.

O sistema auditivo do homem é, portanto, sensível a uma faixa de frequências de 10 oitavas, onde são discriminadas de 3.000 a 4.000 tons diferentes.

No que diz respeito à precisão tonal e equilíbrio espectral percebidos pelo sistema auditivo (8), podemos classificar a percepção aos tons em :

- Sub-graves : 16 Hz à 60 Hz
- Graves : 60 Hz à 100 Hz
- Médios : 100 Hz à 2 KHz
- Agudos : 2KHz à 20KHz

Até hoje não sabemos se as propriedades de ressonância do ouvido tem por finalidade aumentar a sensibilidade da audição ou realizar a análise em frequências dos sons recebidos. Os nossos sentidos aproveitam todas as possibilidades para elevar a resposta em função da energia recebida, sendo possível que as propriedades mencionadas sejam ambas realizadas ou, pelo menos, que a ressonância mecânica seja desejada (3).

Para que se aprecie como o sistema auditivo é considerado o sistema mais sensível do organismo, é interessante que se faça uma comparação com a sensibilidade do sistema visual. Os olhos são sensíveis a apenas 1 oitava, uma vez que as vibrações eletromagnéticas da luz visível situam-se numa faixa de altas frequências, que abrange de $3,84 \times 10^{14}$ Hz a $7,90 \times 10^{14}$ Hz (19).

Variação da sensibilidade com a idade

Em geral, um adulto percebe sons entre 20 Hz e 20 KHz. A medida que a idade avança, perde-se a sensibilidade às altas frequências.

É importante salientar que às baixas frequências, o ouvido sofre pouca alteração com o decorrer dos anos (3). Como o espectro da voz humana situa-se em frequências médias, a perda da audibilidade para as médias e altas frequências, dá origem a uma grande perda de inteligibilidade. Normalmente, os levantamentos audiométricos realizados mostram que o número de pessoas que padecem de perda de audição é muito mais elevado que aquele que se poderia imaginar à primeira vista.

Infra-som e ultra-som

As frequências abaixo de 16 Hz são percebidas mais como vibração mecânica do que como som propriamente dito, sendo classificadas como *infra-sons*. Os fenômenos que acontecem dentro da faixa dos infra-sons pertencem à Sismologia, ciência que estuda os tremores de terra.

Acima dos 25 kHz encontram-se os *ultra-sons*. Cabe ressaltar que a tecnologia voltada para os ultra-sons começou a se desenvolver no final da Segunda Guerra Mundial (3), tanto no âmbito industrial quanto no da medicina.

Alguns animais, como cães e cavalos, escutam frequências até aproximadamente 45 KHz ; morcegos e alguns tipos de ratos, até 70 kHz (altas frequências inaudíveis para o homem)

Distorção não-linear dos ouvidos

As oscilações tanto elétricas quanto mecânicas apresentam não-linearidades quanto às intensidades elevadas (3). As oscilações sonoras são consideradas lineares quando as amplitudes são pequenas, uma vez que o processo sonoro, sendo adiabático¹⁰ é essencialmente não-linear. Entretanto, a não-linearidade que nos interessa não é devida às grandes amplitudes, mas sim, ao próprio mecanismo do ouvido.

Sabe-se que a resposta do ouvido é essencialmente linear e simétrica para os sons de pequena amplitude. Entretanto, se a intensidade aumentar acima de um determinado limite, a relação entre a pressão do som e a resposta do ouvido sofre uma distorção na linearidade.

Esta distorção pode ser observada com grande facilidade. Fazendo-se duas fontes sonoras de frequências não muito afastadas, por exemplo 3.500 Hz e 3.800 Hz, oscilar simultaneamente, ouve-se perfeitamente um sub-harmônico igual a diferença entre as frequências, 300 Hz, cuja audiabilidade parece ultrapassar ligeiramente a dos componentes.

Deslocamento do limiar auditivo : Mascaramento

Sabemos, de experiências diárias, que é possível manter conversação ou ouvir música com intensidade muito baixa quando o ambiente está silencioso. Na presença de barulho ou ruído de fundo de alguma intensidade, há necessidade de maior volume da música para que o ouvinte possa entender. Então, a presença de sons reduz, no caso geral, a sensibilidade do ouvido a outros sons, dando como consequência um deslocamento no contorno da audiabilidade. Tal fenômeno é conhecido como mascaramento (4).

¹⁰ Processo de transformação em que não ocorrem trocas térmicas com o exterior.

Também de experiências diárias, sabemos que quando dois sons são emitidos simultaneamente, somente o mais intenso é ouvido corretamente, na maioria dos casos. O som mais intenso é o “mascarador” e o som não percebido é o “mascarado”. Tecnicamente, todas as vezes que o limiar de audibilidade¹¹ de um determinado som for deslocado pela presença de um outro som, tem-se um mascaramento na audibilidade do primeiro.

A *presbiacusia*, isto é, o envelhecimento natural do sistema auditivo (4), leva ao deslocamento do limiar auditivo de um indivíduo. A partir dos 30 anos de idade, agravando-se com o passar dos anos, a perda auditiva vai se acentuando, especialmente para as altas frequências. Embora esse deslocamento do limiar seja naturalmente devido à idade, alguma responsabilidade também deve ser atribuída às condições do barulho que atingem o homem, não só provindos do desenvolvimento tecnológico, mas também das atividades diárias às quais o homem moderno está exposto, especialmente nas grandes cidades.

Experiências comprovaram que os tons de alta frequência são mascarados com maior facilidade do que os de baixa frequência. É mais fácil, portanto, mascarar a voz feminina, cuja frequência fundamental é mais alta do que a voz masculina.

Fadiga auditiva

O deslocamento do limiar da audição também pode ocorrer quando um estímulo sonoro, principalmente em alto nível de intensidade, preceder a audição de um determinado som, produzindo *fadiga auditiva*. Dois efeitos podem acontecer:

1. Como consequência da fadiga, acontece um deslocamento temporário do limiar auditivo ou TTS (*Temporary Threshold Shift*) (8), causado pela presença de um outro som em alta intensidade.
2. Quando o ouvido é exposto a um alto nível de intensidade em longa exposição, pode causar um deslocamento permanente do limiar auditivo ou PTS (*Permanent Threshold Shift*) (8), resultando em lesão da cóclea e, conseqüentemente, em surdez.

¹¹ Audibilidade, segundo o Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa, é a qualidade do que é audível.

Através de estudos feitos em cóclea animal, verificou-se que os prejuízos causados por longa exposição a altos níveis sonoros podem causar desde a perda de algumas células ciliadas externas, com ou sem a degeneração das células de base, até a ausência total nas células ciliadas externas e internas, inclusive, muitas vezes, com total ruptura do órgão de Corti.

Audição binaural

A precisão com a qual aprendemos, através das experiências, localizar uma fonte sonora, isto é, se a mesma está à nossa frente, atrás de nós, do lado esquerdo ou direito, acima ou abaixo, devemos à difração do som. O som alcança nossos ouvidos independentemente da direção de onde provenha ou da disposição da fonte sonora, pois contorna os obstáculos.

A binauralidade (8), isto é, a função dos dois ouvidos para a localização dos sons (figura 36), constitui fenômeno tão importante que, um indivíduo que apresente uma diferença significativa no limiar auditivo entre os dois ouvidos, mesmo que em uma única frequência, perde a direção da proveniência do som.

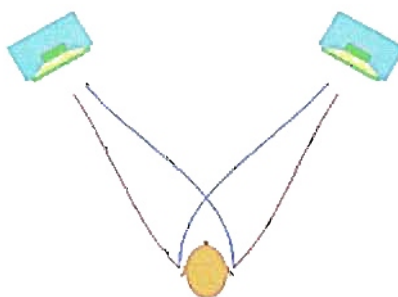


Figura 36 – Audição binaural (8).

O efeito da intensidade na localização do som

Quando dois sons de diferentes intensidades atingem isoladamente cada um dos ouvidos, o ouvinte tende a imaginar que a fonte está localizada do lado em que foi apresentado o som de maior intensidade.

No caso em que uma fonte única esteja situada junto a uma das orelhas, sendo assim um azimute¹² de 90°, o tom não atingirá ambas as orelhas com a mesma intensidade, uma vez que a cabeça representa um obstáculo à chegada do som na orelha mais distante da fonte (20).

É produzida uma “sombra acústica” e a extensão dessa sombra vai depender do valor da frequência (15).

Nas frequências baixas, a cabeça não constitui obstáculo à chegada do som na orelha contralateral, porque, nessa faixa de frequências, o comprimento de onda envolve a cabeça (vide equação 1). A frequência de 800 Hz, por exemplo, corresponde a um comprimento de onda de 0,42 m, ou seja, duas vezes a distância que separa as duas orelhas, cerca de 0,21 m. A influência será sempre maior para as altas frequências, quando os comprimentos de onda são pequenos em relação à dimensão da cabeça. Para uma frequência de 2.000 Hz, cujo comprimento de onda mede, aproximadamente, 0,17 m, já existe a presença da sombra acústica, devido à influência da cabeça.

O efeito de fase na localização do som

Como já descrevemos, nas baixas frequências, quando o comprimento de onda excede a distância entre os dois ouvidos, a onda sonora “envolve” a cabeça. Com isso, a diferença de intensidade torna-se tão pequena entre o som que chega a um e outro ouvido, tornando-se insuficiente para explicar o efeito da localização binaural do som.

No caso das frequências baixas, a única alternativa para a localização binaural seria o efeito da fase (21). A diferença de fase significa que a crista da onda atingiu primeiramente um ouvido antes da outra, evidenciando a localização.

¹² Azimute é o ângulo formado entre a direção do som e o plano médio das orelhas.

O efeito de tempo na localização do som

Se os ouvidos não estão localizados a igual distância da fonte sonora, aparece uma disparidade no tempo de chegada do som entre as orelhas (21). Para que tenhamos uma idéia da capacidade potencial dos ouvidos, estes estão habilitados a detectar diferenças entre os momentos de incidência da ordem de 20 a 30 microsegundos¹³. Essa condição prevalece quer estejamos de frente ou de costas para a fonte sonora. Quando a fonte sonora está exatamente à nossa frente, os dois ouvidos recebem ao mesmo tempo as mesmas informações.

¹³ 1 microsegundo vale $1,0 \times 10^{-6}$ segundos

PARTE VI – ALGUMAS CURIOSIDADES ACÚSTICAS

Alguns fatos observados em nosso cotidiano, por vezes, passam despercebidos de qualquer análise. Porém, ao observarmos mais atentamente certos acontecimentos, podemos notar o quanto o estudo do som é importante em nossa relação com a própria natureza. Podemos destacar algumas curiosidades

- ❑ Os peixes não têm ouvidos. Eles captam movimentos na água com a linha lateral, que é o centro nervoso do animal, que contém uma camada de células sensíveis às vibrações.
- ❑ As orelhas enormes do elefante o ajudam a ouvir infra-sons, detectando assim, ruídos inaudíveis ao homem.
- ❑ A maioria das espécies dos morcegos tem olhos muito pequenos, do tamanho aproximado de uma cabeça de alfinete. Por isso, não são capazes de identificar formas, permitindo ao animal, no máximo, distinguir entre claro e escuro. Para traçar suas rotas noturnas e localizar presas, o morcego usa um sistema denominado *eco-orientação*, que funciona como um sonar. Emite com a boca ultra-sons da ordem de 120.000 Hz (seis vezes maior que o limite humano), depois ouve as ondas refletidas nos obstáculos. Desse modo, o morcego forma em seu cérebro uma “imagem sonora”. Em alguns casos, os sons são emitidos pelo nariz do animal, cuja narina possui, em sua volta, uma fina membrana que funciona como amplificador. As precisas imagens sonoras recebidas por seus ouvidos, possibilitam que este contorne obstáculos tão finos como um arame, sem tocá-los, e que localize presas na escuridão absoluta. São os precursores do radar.
- ❑ Todos nós já tentamos ouvir o barulho do mar dentro de uma concha em forma de espiral. Na verdade, o murmúrio constante que ouvimos é o som amplificado do seu próprio sangue correndo nos vasos sanguíneos.
- ❑ Você acha estranha a sua própria voz no gravador ? Pois essa é sua voz verdadeira. Quando falamos, parte do som chega aos ouvidos por dentro da cabeça, através dos ossos.

- ❑ Fato intrigante : como pode um mosquitinho produzir um barulho tão alto e irritante capaz de nos acordar no meio do sono ? Simples. O mosquito bate suas asas entre 1.000 e 3.000 vezes por segundo. É a faixa de maior sensibilidade do ouvido humano.
- ❑ Quando Ludwing van Beethoven compôs a sua nona sinfonia, estava completamente surdo. Consequia analisar sua obra pelo chão de madeira, que transmitia a vibração para seus pés, e pela vibração no tampo de seu piano.
- ❑ Como já foi visto, os ultra-sons, que podem ser produzidos por diversos aparelhos, são sons que possuem uma frequência superior à faixa audível do ser humano. Mas grande parte da nossa fauna tem capacidade de emití-lo e ouvi-lo. O primeiro aparelho elétrico de ultra-som foi criado em 1900, na França, para fins militares, como detectar objetos submarinos.
- ❑ O som das igrejas (principalmente as católicas), é confuso propositalmente. Nossos antepassados seguiam regras ditadas pelas ordens superiores religiosas para a construção de templos. Estes obrigatoriamente eram de grandes dimensões, para obterem tempos de reverberação muito altos. Com isso, a fala dos sacerdotes e o canto dos corais soavam como algo grandioso, “vindo dos céus”, divino.
- ❑ A parte central da Basílica de São Pedro, em Roma, tem 110 metros de comprimento e altura média de 18 metros. O tempo de reverberação é tão grande (11 segundos) que, se um velocista de 100 metros rasos partisse do altar ao ouvir o disparo de uma arma, concluiria sua corrida dentro da igreja ainda ouvindo o som do disparo sendo refletido nas duras paredes e pisos de granito do templo. Ele perceberia que o som seria contínuo e decrescente.
- ❑ A voz humana é produzida por instrumentos muito especiais: os órgãos de fonação. O fato de os homens geralmente terem voz mais grave que mulheres e crianças se deve às cordas vocais masculinas serem mais longas e possuírem maior massa. Além disso, a laringe é bem maior nos homens. Entre as vozes masculinas, o *baixo*, a mais grave, alcança sons aproximados de 87 Hz a 349 Hz; o *baritono* vai de 98 Hz a 392 Hz; e o *tenor*, a mais aguda, de 131 Hz a 494 Hz.

A mais aguda das vozes femininas, a *soprano*, consegue sons de 247 Hz a 1.175 Hz; enquanto a mais grave, a *contralto*, abrange de 175 Hz a 698 Hz.

PARTE VII – RUÍDO E SEUS EFEITOS SOBRE A AUDIÇÃO

Definição

Não é fácil apresentar uma definição de ruído que possa considerar-se plenamente satisfatória. Em acústica, o problema da definição de ruído não se confina ao domínio da física simplesmente, devendo ser tomadas considerações de natureza biológica e psicológica. Segundo a definição mais aceitável, *ruído* é todo som indesejável que possa causar distúrbios à tranqüilidade e ao aparelho auditivo (2). Porém, este é classificado de maneira extremamente subjetiva, já que o mesmo tipo de som pode ser perturbador para uns e não tanto para outros. Por esse motivo, uma classificação mais específica do ruído, sob o ponto de vista de origem e duração, torna-se tarefa árdua de muita experimentação.

O ruído tornou-se um dos principais fatores de degradação da qualidade de vida das populações. Constitui um problema que tende, a longo prazo, a agravar-se devido ao desenvolvimento desequilibrado da urbanização, ao aumento significativo da mobilidade destas populações e ao incremento da mecanização. Tantos são os motivos preocupantes em relação ao ruído, que autoridades no assunto enfatizam o surgimento de problemas legais de grande proporções, obrigando ainda a criação de legislações específicas para o combate do mesmo.

Estudos recentes e observações científicas provaram que a exposição a ruídos intensos podem provocar alterações em atividades normais do ser humano, chegando ainda a causar distúrbios e doenças de maior gravidade.

Devido às controvérsias relacionadas a dosagem suportável de barulho, o maior problema do ponto de vista legal consiste na dificuldade da medida. Uma maneira racional de medir ruído não deve levar somente em consideração aspectos sensoriais mas também medidas objetivas quanto à intensidade, frequência e faixa espectral, levando inclusive a criação de normas específicas de caracterização e controle.

Fontes de ruído e métodos de combate

Já estudamos que toda vibração em um meio elástico produz som, e que este, dependendo do nível de intensidade, pode se tornar um ruído. Explosões, sons produzidos por máquinas de combustão ou por radiação são exemplos de geração de som por meio de sistemas mecânicos comuns, que tanto afetam o conforto humano.

Para isso, é preciso criar-se maneiras de combater o barulho. Dentre as técnicas (2) aplicáveis e conhecidas dois métodos se destacam:

- a) o método direto: consiste em combater o barulho diretamente na fonte de origem. Para tal é necessário um total conhecimento da causa do barulho, como vibrações estruturais por exemplo;
- b) o método indireto: quando a utilização de método direto torna-se inviável, devido principalmente a natureza técnica e econômica, o uso do método indireto faz-se necessário. Consiste basicamente em eliminar (ou mesmo diminuir) a via de transmissão do barulho, desde a fonte até o local onde este cause desconforto. Como exemplo, podemos citar a utilização de materiais de absorção acústica em salas e o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) por pessoas que ficam expostas a barulhos intensos.

Repercussão sobre a saúde

Recordando o sistema auditivo, podemos verificar que o caminho que o som percorre desde sua fonte emissora até atingir os centros nervosos cerebrais é extremamente delicado. E se este sistema estiver exposto à ação de ruídos intensos, é bem provável que ocorra o que chamamos de *trauma acústico* (19). Sendo este de ordem profundamente psicológica, a influência do ruído afeta as diversas pessoas de maneiras diferentes. Um indivíduo adulto normal precisa dispensar cerca de 20% de energia extra para efetuar suas tarefas, quando está sob efeito de um ruído perturbador intenso. Por isso, quanto mais debilitado estiver o organismo, mais predisposto este estará a sofrer as conseqüências do trauma acústico. Conseqüentemente, idosos, crianças e doentes são bem mais vulneráveis à ação dos sons perturbadores.

No sentido geral, os efeitos do ruído sobre o homem podem ocorrer de diversas maneiras, como :

- Problemas de audição, alterando a gama de percepção do som audível, provocando dor e podendo até mesmo danificar de forma irreversível o mecanismo fisiológico da audição;
- Perturbações de origem fisiológicas diversas, tais como flutuações de pulsações cardíacas, hipertensão arterial, vasodilatação dos vasos periféricos e ainda contração dos músculos das vísceras e modificações do funcionamento das glândulas endócrinas;
- Perturbações do sono, como dificuldade em adormecer, mudança na duração de estágio de sono profundo;
- Perturbações ou mesmo diminuição do rendimento do trabalho, aumentando o número de erros e acidentes no mesmo;
- Interferência na comunicação oral;
- Irritabilidade quando, por exemplo, o ruído se sobrepõe e mascara uma informação desejada;
- Aparecimento de estágios de medo e violência no comportamento (22).

Perda de audição induzida por ruído

A exposição contínua a altos níveis sonoros, pode dentre outras doenças, causar deficiência auditiva no indivíduo, mesmo existindo variações individuais consideráveis à susceptibilidade ao barulho. Porém, uma série de padrões e normas surgiram para orientar o quanto de intensidade sonora uma pessoa pode tolerar sem causar danos ao seu aparelho auditivo. Apesar de, como já mencionado, esses níveis permanecerem controversos, a orientação básica é não ficar o indivíduo exposto à níveis que excedam 90 dB (2).

Como exemplo prático, a *OSHA* (Occupational Safety and Health Act), um órgão dos Estados Unidos (2), baseados em experimentos com milhares de pessoas, estabeleceu critérios de exposição que protegiam aproximadamente 90 % dos indivíduos testados. O resultado segue na tabela de tempo de exposição versus nível de intensidade.

TEMPO DE EXPOSIÇÃO (HORAS)	NÍVEL DE INTENSIDADE (dB)
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1 ½	102
1	105
¾	107
½	110
¼	115

Estudos em indivíduos que possuem longo histórico de exposição ao barulho, concluíram que a perda auditiva se faz principalmente na região compreendida entre 2KHz e 6KHz. A perda de audição temporária pode ser facilmente constatada após o fim de um horário de trabalho, mas desaparece após algumas horas de repouso. Porém, o grande problema resulta da exposição contínua, onde a possibilidade do aparecimento de surdez definitiva é fato concreto. Geralmente, a perda da audição nas frequências acima mencionadas, afetará de forma severa a habilidade para entender a fala normal. A figura 37 ilustra audigramas de diferentes graus de surdez.

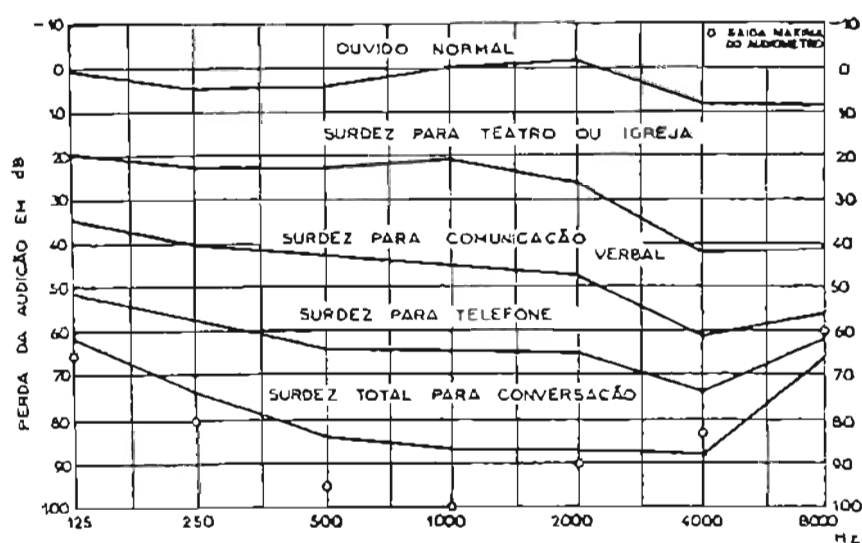


Figura 37 – Audigrama com diferentes graus de surdez (3).

Zumbido induzido pelo ruído

Embora a causa seja desconhecida, muitas pessoas que têm histórico de exposição ao barulho apresentam um ruído característico denominado zumbido. Porém vale salientar que o ruído não é “a causa” mais provável do zumbido e este pode estar associado ou não com perda auditiva. A maioria dos pacientes com zumbido desenvolvem também problemas auditivos, mas estudos comprovaram que 10 % dos pacientes que sofrem deste incômodo ruído possuem audição dentro de limites de normalidade (19).

O zumbido que é resultado de exposição ao barulho pode ocorrer de forma instantânea ou muito gradativa. O de forma instantânea é consequência de exposição prolongada a sons de muita intensidade. Uma vez cessado esse som, o zumbido tende a desaparecer rapidamente, tornando-se inaudível. Porém se a exposição ao barulho acontecer de forma contínua, por meses ou até anos, o zumbido frequentemente aumenta de intensidade e poderá se tornar constante. Este ruído incômodo se parece com tons externos da faixa de frequência de 3KHz.

Programas de conservação da audição

Se os níveis de ruído ultrapassarem a grandeza de 85 dBA, é de extrema necessidade a implantação de algum programa de conservação auditiva. Estes programas, geralmente, são desenvolvidos por empresas especializadas, por força de Lei ou não. O importante é a consciência individual e a orientação das empresas para o uso de aparelhos de proteção auditiva no quadro de funcionários, visando resguardar o aparelho auditivo contra danos futuros.

Normas e leis brasileiras sobre ruído

No Brasil, os problemas acústicos estão divididos em duas naturezas legais (2):

- *Competência industrial ou empresarial*: essa abordagem é regulamentada pelo Ministério do Trabalho, através da portaria 3214/78, NR-15 e anexos 1 e 2.

preocupando-se com mais afínco com a conservação auditiva dos trabalhadores;

- *Competência urbana ou comunitária*: esses problemas da área urbana são regulamentados pela Resolução nº 1, de 08/03/1990, do CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente, ligado ao Ministério do Meio Ambiente, atendendo mais ao incômodo comunitário.

Percebemos , com isso, que surge agora um problema de duplicidade legal no equacionamento dos problemas acústicos no país. Além do nível federal, existem inúmeras leis vigentes de âmbitos estadual, ou municipal.

Essa variedade de leis , sejam elas federais, estaduais ou municipais, são, geralmente, fundamentadas em normas internacionais, destacando-se as da ISO – Organização Internacional de Padrões, e, no Brasil, as da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Daí o grande número de pontos de conflito derivados dessas diferentes normas legais, podendo existir outras inúmeras interpretações.

Neste trabalho, serão mostradas as normas com padrões de âmbito federal, sem discutirmos os níveis estaduais ou municipais, pois fugiria do objetivo deste.

No Anexo 2, apresentamos uma tabela com a norma ABNT-NB-10152/87, que indica os limites aconselháveis de ruído em vários locais.

A Portaria Federal Nº 3214/78, no âmbito do Ministério do Trabalho, indica os limites de tolerância a ruídos contínuos, como demonstra o Anexo 3.

RESOLUÇÃO CONAMA N.º 001, de 08 de março de 1990 (23)

“O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, no uso das atribuições que lhe confere o Inciso I, do § 2º, do Art. 8º do seu Regimento Interno, o Art. 1º da Lei 7.804 de 15 de julho de 1989, e considerando que os problemas dos níveis excessivos de ruído estão incluídos entre os sujeitos ao Controle da Poluição de Meio Ambiente.

Considerando que a deterioração da qualidade de vida, causada pela poluição, está sendo continuamente agravada nos grandes centros urbanos;

Considerando que os critérios e padrões deverão ser abrangentes e de forma a permitir fácil aplicação em todo o Território Nacional, RESOLVE:

I - A emissão de ruídos, em decorrência de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política, obedecerá, no interesse da saúde, do sossego público, aos padrões, critérios e diretrizes estabelecidos nesta Resolução.

II - São prejudiciais à saúde e ao sossego público, para os fins do item anterior os ruídos com níveis superiores aos considerados aceitáveis pela norma NBR 10.152 - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o conforto da comunidade, da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

III - Na execução dos projetos de construção ou de reformas de edificações para atividades heterogêneas, o nível de som produzido por uma delas não poderá ultrapassar os níveis estabelecidos pela NBR 10.152 - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o conforto da comunidade, da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

IV - A emissão de ruídos produzidos por veículos automotores e os produzidos no interior dos ambientes de trabalho, obedecerão às normas expedidas, respectivamente, pelo Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN, e pelo órgão competente do Ministério do Trabalho.

V - As entidades e órgãos públicos (federais, estaduais e municipais) competentes, no uso do respectivo poder de política, disporão de acordo com o estabelecido nesta Resolução, sobre a emissão ou proibição da emissão de ruídos produzidos por quaisquer meios ou de qualquer espécie, considerando sempre os local, horários e a natureza das atividades emissoras, com vistas a compatibilizar o exercício das atividades com a preservação da saúde e do sossego público.

VI - Para os efeitos desta Resolução, as medições deverão ser efetuadas de acordo com a NBR 10.151 - Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o conforto da comunidade, da ABNT.

VII - Todas as normas reguladoras da poluição sonora, emitidas a partir da presente data, deverão ser compatibilizadas com a presente Resolução.

VIII - Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

RETIFICAÇÃO

. No D.O.U. de 02.04.90, pág. 6.408, Seção I, no item II, da Resolução CONAMA n.º 001 de 08.03.90, onde se lê: NBR 10.152, LEIA-SE: NBR 10.151.

. No D.O.U. de 02.04.90, pág. 6.408. Seção I, no item III, da Resolução CONAMA n.º 001 de 08.03.90, onde se lê: ... Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o conforto da comunidade..., LEIA - SE: ...níveis de Ruído para conforto acústico... “

CONCLUSÃO

O estudo do som, bem como os fenômenos da acústica, permanecem pouco conhecidos dos alunos no ensino médio. Uma abordagem mais complexa, como a que apresentada nesta monografia sobre o estudo do som e seus efeitos sobre a audição humana, permitirá demonstrar aos alunos que o ensino na escola pode induzir à formação de conceitos de cidadania em si; a consideração ao próximo e a si mesmo, no que diz respeito a limites de intensidade sonora. Percebe-se que os jovens, de uma maneira geral, se expõem cada vez mais a níveis altíssimos de ruído, justificado em sua grande parte por modismos e pelo desconhecimento completo do perigo que isso possa ocasionar.

Como os PCN's recomendam, a apropriação dos conhecimentos físicos devem ser desenvolvidos de forma gradual, a partir de elementos próximos, práticos e vivenciais do aluno. Os novos parâmetros apontam para a necessidade de atualização dos conteúdos enfatizando a Física Contemporânea, como um desdobramento de outros conhecimentos, e não necessariamente como um tópico a mais no curso.

De uma maneira geral, a escola deve implementar em sala de aula estudos específicos relacionados ao combate ao ruído, de maneira construtivista, para a formação de cidadania. Demonstrando, assim, de maneira clara e objetiva que o ruído não é o único problema, mas que está inserido num conjunto de efeitos desagradáveis, decorrentes do desenvolvimento sem planejamento das cidades e do mal uso de novas tecnologias.

A pretensão deste trabalho foi contribuir, de alguma forma, para o conhecimento de um assunto tão comum no cotidiano, porém pouco explorado nas escolas. Tenta, ainda, fazer um alerta sobre os efeitos da exposição excessiva a níveis de ruído encontrados facilmente no cotidiano, alertando de que o problema da perda da audição pode ser evitada, bastando, para isso, usar o simples bom senso.

Anexo 1 – TABELA DE NÍVEIS DE RUÍDOS COMUNS (2)

A tabela que se segue visa demonstrar a variação do níveis de ruídos mais comuns em nosso cotidiano, a fim de que possamos apurar a intensidade de sua influência em nossas vidas.

TABELA DE RUÍDOS	
FONTE	NÍVEL EM dB
Murmúrio	30 dB
Furadeira elétrica	80 dB
Pregão de Bolsa de Valores	90 dB
Automóvel	90 dB
Rádio em alto volume	100 dB
Piano	110 dB
Britadeira	110 dB
Tráfego de caminhões	120 dB
Orquestra sinfônica	130 dB
Avião comercial	160 dB
Propulsor de caça supersônico	170 dB

Anexo 2 – Tabela com Norma ABNT – NB – 10152/87 (23)

A tabela que se segue visa demonstrar os limites aconselháveis de ruídos em distintos locais, de uso corrente.

LOCAIS	NORMA - ABNT
	10152/1987
	DB
Hospitais:	
Apartamento, Enfermaria, Berçários, Centro cirúrgico	30-40
Laboratórios, Áreas para uso do público	35-45
Serviços	40-50
Escolas:	
Bibliotecas, Salas de música, Salas de desenho	30-40
Salas de aula, Laboratórios	35-45
Circulação	40-50
Hotéis:	
Apartamentos	30-40
Restaurantes, Salas de estar	30-45
Portaria, Recepção, Circulação	40-50
Residências:	
Dormitórios	30-40
Salas de estar	35-45
Auditórios	
Salas de concertos, Teatros	25-30
Salas de Conferências, Cinemas	
Salas de uso múltiplo	30-35
Restaurantes	35-45
Escritórios:	
Salas de reunião	25-35
Salas de gerência, de projeção e Salas de administração	30-40
Salas de computadores	40-60
Salas de mecanografia	45-55
Igrejas e Templos	35-45
Locais para esportes:	
Pavilhões fechados para espetáculos e atividades esportivas	40-55

Anexo 3 – Tabela contendo Portaria Federal nº 3214/78.

Limites de tolerância para ruído contínuo (23).

Esta tabela remete às normas ISO 2631 e ISO/DIS-5349, as quais demonstram os limites de tolerância para ruído intermitente.

LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDO CONTÍNUO OU INTERMITENTE	
NÍVEL DE RUÍDO - dB	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Anexo 4 - Experiências Didáticas

São apresentadas a seguir, algumas atividades de fácil montagem, visando demonstrar experimentalmente alguns tópicos relacionados no trabalho. Estes experimentos enfatizam os efeitos de *ressonância* e *Doppler*, e ainda, os efeitos da psicoacústica, demonstrados nos experimentos que utilizam as caixas acústicas.

Experimento 1 – Ressonância com taças de cristal.

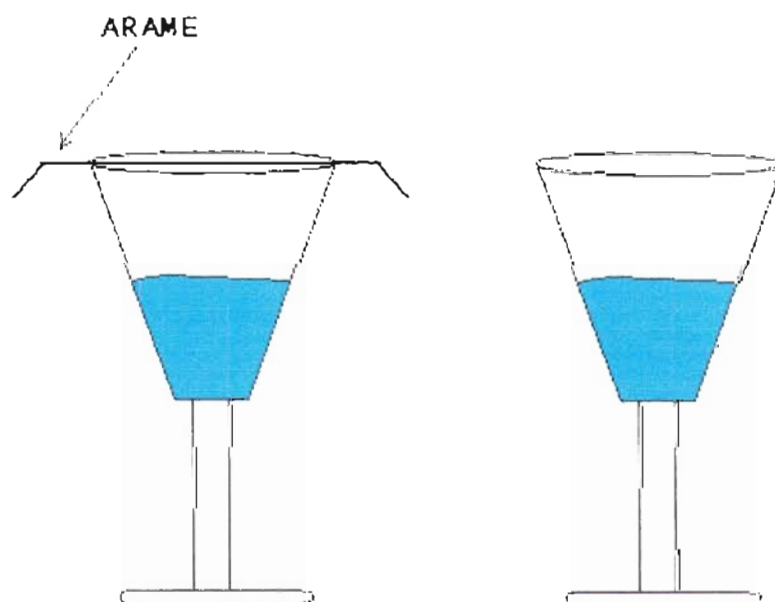
Observação do efeito da ressonância mecânica utilizando materiais domésticos.

Material utilizado

- 2 taças de cristal idênticas;
- pedaço de fino arame (pode ser substituído por um clipe desdobrado),
- água (opcional) para igualar possíveis diferenças do material.

Montagem

Colocam-se as duas taças de cristal sobre uma mesa, afastadas 5 cm aproximadamente uma da outra. Numa delas, estica-se sobre sua boca o fino arame. Com a ponta dos dedos molhada, executa-se na borda da outra taça movimentos circulares, produzindo um tom característico.



O que se observa ?

Ao passarmos a ponta do dedo na borda do cálice, surgirá uma vibração com determinada frequência, que pode ser ouvida perfeitamente. Como a outra taça é idêntica, esta começará a vibrar na mesma frequência daquela que gera o som, provando assim o efeito de *ressonância*. O arame vai deslizando através da boca da taça até cair.

Explicação do fato

Como as taças são idênticas, a que está com o arame, passa a vibrar por *ressonância*, fazendo com que o arame caia. Isso possibilita uma verificação prática do efeito físico.

Perguntas

Porque é necessário que sejam taças de cristal ? Em copos comuns de vidro, não acontece o efeito ?

Experimento II – Efeito Doppler: fonte sonora girando na extremidade de um barbante.

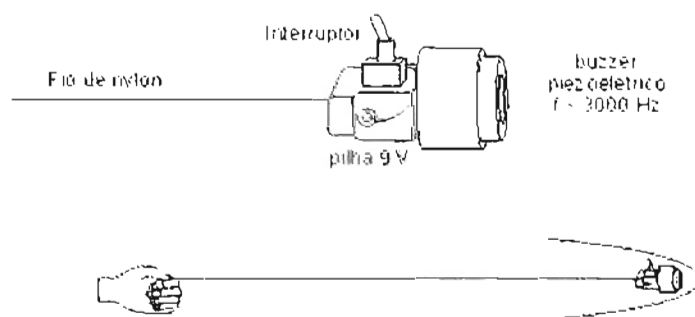
Uma observação fácil do efeito Doppler utilizando materiais bem simples, que podem ser adquiridos em casas de produtos eletrônicos

Material utilizado

- 1 metro de barbante (ou fio de nylon);
- 1 buzzer piezoelétrico (pequena campainha que funciona à pilha);
- 1 pilha ou bateria com voltagem compatível com o buzzer;
- 1 interruptor simples.

Montagem

Amarra-se o pequeno buzzer na extremidade do barbante. Liga-se o buzzer e colocamos o sistema a girar segurando em uma das extremidades do barbante.



O que se observa ?

Ao girar o sistema, o som emitido varia do mais agudo ao mais grave, dependendo da posição em relação ao ouvinte.

Explicação do fato:

Quando a fonte está em movimento a frequência percebida pelo observador varia, do mais agudo (maior frequência), ao mais grave (menor frequência). Prova-se com isso que o *Efeito Doppler* provoca uma mudança da frequência da onda sonora emitida pela fonte em movimento.

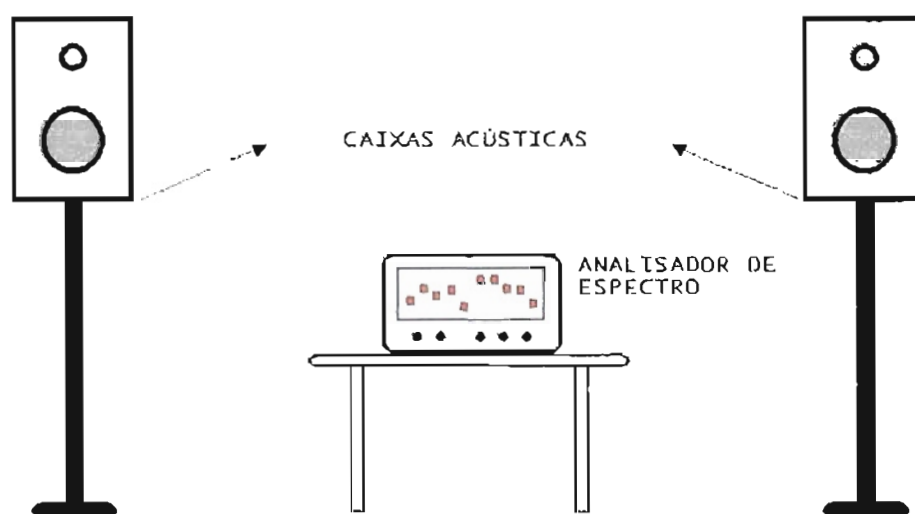
Experimento III – Visualizando frequências audíveis.

Material utilizado:

- 2 caixas acústicas, que respondam ao espectro de frequência audível (de 20 Hz até 20 KHz);
- 1 pequeno amplificador;
- 1 CD player;
- 1 compact disc que contenha sinais de áudio diversos, chamados geralmente de Setup Compact Disc.
- 1 analisador de espectro de frequência em tempo real (do inglês RTA – real time analyser);
- 2 pedestais.

Montagem

Colocam-se as caixas acústicas distantes horizontalmente uma da outra, de modo que os ouvintes fiquem o mais centralizados à frente destas. Ao executarmos as faixas do CD com diferentes tons, observa-se o comportamento das ondas sonoras no painel do analisador de espectro.



O que se observa ?

Ao serem executados as faixas contendo sinais puros e divididos em $1/3$ de oitava, o ouvinte visualiza no painel do RTA qual a faixa de frequência que está sendo executada.

Explicação do fato

O RTA é um aparelho eletrônico composto de um microfone muito sensível à pressões sonoras. Um filtro eletrônico separa as pressões recebidas em frequências de oscilação, e passa a informação para um painel composto por leds, subdivididos em escala de $1/3$ de oitava.

Experimento IV – Audição binaural.

A precisão como localizamos se uma fonte sonora está à nossa frente, atrás, dos lados, acima ou abaixo de nós, deve-se ao fato de que o som não se propaga obrigatoriamente em linha reta. Este experimento demonstra como podemos localizar a emissão de sons.

Material utilizado

O mesmo material do experimento III.

Montagem

A mesma do experimento III, porém as faixas do CD executadas emite sons com intensidades variadas nos dois canais (esquerdo e direito).

O que se observa ?

Ao colocar-se a fonte de sinais específica, que emite sons com intensidades variadas nos dois canais, a percepção auditiva fica focada em diversos pontos do espaço físico da sala, entre as duas caixas. A platéia pode perceber, de uma maneira audiovisual, como os ouvidos são eficientes receptores, podendo “enxergar” em diferentes pontos do espaço os sons provenientes de uma fonte estereofônica.

Explicação do fato

A imagem acústica é formada por diferenças de intensidade, tempo ou fase entre os dois canais. Este fato determina como a platéia tem a sensação de que o som caminha no eixo horizontal, passando de uma caixa para outra.

Experimento V – O ar como massa vibrante: o ressoador de Helmholtz.

Este experimento é bem parecido com o que o próprio Helmholtz cita em seu livro “Sensações de Tons”, publicado em 1863, que prova que o ar contido dentro de um ressoador pode vibrar na mesma frequência da fonte emissora.

Material utilizado

- 1 garrafa plástica VAZIA, volume ~ 2 litros;
- 1 fonte sonora, que pode ser uma caixa acústica;
- 1 gerador de áudio senoidal, com varredura de 20 Hz até 20 KHz, com precisão da ordem de 1Hz;
- 1 amplificador de áudio;
- 1 vela;
- fósforos para acender a vela.

Montagem

Coloca-se o ressoador apoiado sobre uma mesa. Na frente da boca da garrafa, coloca-se a vela acesa. Liga-se o amplificador. Aplica-se um sinal senoidal pelo gerador de áudio, começando em 20 Hz, e eleva-se a faixa de frequência até podermos observar que a chama da vela começa a ser soprada na direção inversa ao do gargalo da garrafa.



O que se observa ?

Para uma determinada frequência aplicada no amplificador, pode-se observar que o ar contido dentro da garrafa sopra em direção à vela, fazendo com que a chama incline-se na direção oposta ao gargalo do ressoador.

Explicação do fato

Em determinada frequência obtida pelo gerador de ondas e aplicada ao amplificador, podemos perceber que o ar contido dentro do ressoador começa a ser

expelido pelo gargalo, fazendo com que a chama da vela inclina-se. Isso se deve ao fato do surgimento de uma vibração do ar contido no interior do ressoador. Esta vibração tem a mesma ordem de frequência da emitida pelo alto-falante, explicando o fato do ar contido no garrafão entrar em *ressonância* com a frequência emitida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *Parâmetros Curriculares Nacionais no Ensino Médio*. 1995. Disponível:
<http://www.mec.gov.br/semtec/ensmed/pen.shtm>
2. SILVA, Péricles. *Acústica arquitetônica e condicionamento de ar*. 4ª edição. Belo Horizonte: EDTAL E. T. LTDA, 2002.
3. NEOPOMUCENO. L. X., *Acústica*. São Paulo: Editora Blucher LTDA. 1997.
4. CROCKER, Malcom, PRICE, John. *Noise and noise control*. Ohio: CRC Press, 1975
5. GEYMONAT, Ludovico. *Galileu Galilei*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.
6. ROSSING, Thomas, FLETCHER, Neville. *Principles of vibration and sound*. New York: Springer, 1995.
7. PARANÁ. Djalma Nunes da Silva. *Física para o ensino médio*. V.2. São Paulo: Editora Ática, 1999.
8. CYSNE, Luiz F. Otero. *EASY, Programa de Treinamento Auditivo*. São Paulo: 1997.
9. GASPAR, Alberto. *Física 2 – ondas, óptica e termodinâmica*. 1ª edição. São Paulo: Editora Ática, 2000.
10. SUPER INTERESSANTE. Ouvido: Som e Equilíbrio. São Paulo: Abril, v. 7, 1998.
11. BERTONI. Rosalfonso. *Amplificadores de áudio*. 1ª edição. Rio de Janeiro: H. Sheldon, 2002.

12. RAMALHO, Francisco, FERRARO, Nicolau, SOARES, Antonio de Toledo. *Os fundamentos da Física*. 6ª edição. São Paulo: Moderna, 1993.
13. *A high school physics tutorial*. Disponível: <http://www.physicsclassroom.com>
14. HALL, Donald. *Basic Acoustics*. New York: Harper & Row Publishers Inc., 1987.
15. MOSCAL, Tony. *The basics of sound and sound systems*. New York: Hal Leonard, 1994.
16. DOOLE, Stuart. *Tacoma Narrows Bridge Disaster*. United Kingdom. Disponível: <http://www.enm.bms.ac.uk>
17. *History of Tacoma Narrows Bridge*. University of Washington. Disponível: <http://www.lib.washington.edu/specialcoll/tnb>, 1999.
18. KOPF-MAIER, Petra. *Atlas da Anatomia Humana*, v. 2. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2000.
19. ALFORD, Bobby. *Nature's Solutions for Listening*. Department of Otorhinolaryngology and Communicative Sciences. Baylor College of Medicine, 1997. Disponível: <http://www.bcm.tmc.edu/oto/research/cochlea/Volta/04.html>, dez. 2001.
20. OLSON, Harry. *Acoustical engineering*. D. Van. Nostrand Co., 1957
21. DICKASON, Vance. *The Loudspeaker Design Cookbook*. 5ª edição. Peterborough: Audio Amateur Publications, 1991.
22. MOSCI, Armando Starling, DINIZ, João Luiz Pereira. *Estudo da exposição ao ruído: impacto no policial militar*. Belo Horizonte. Disponível: <http://www.ieb.ufmg.br/ipf/2-21.html>, 1997.

23. *Resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente*. Disponível:
<http://www.mma.gov.br/port/conama>